



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

RANCANG BANGUN TOMOGRAFI KAPASITANSI
LISTRIK DENGAN SENSOR TERSEGMENTASI
DAN BERPERISAI UNTUK DETEKSI BENDA
DALAM PIPA

Ardian Wardhana
NRP 2212100098

Dosen Pembimbing
Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.
Fajar Budiman, ST., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - TE 141599

RANCANG BANGUN TOMOGRAFI KAPASITANSI
LISTRIK DENGAN SENSOR TERSEGMENTASI
DAN BERPERISAI UNTUK DETEKSI BENDA
DALAM PIPA

Ardian Wardhana
NRP 2212100098

Dosen Pembimbing
Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.
Fajar Budiman, ST., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

DESIGN OF ELECTRICAL CAPACITANCE
TOMOGRAPHY WITH SEGMENTED AND
SHIELDED SENSOR FOR DETECTION OF
OBJECT INSIDE PIPE

Ardian Wardhana
NRP 2212100098

Advisor
Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.
Fajar Budiman, ST., M.Sc.

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan tugas akhir saya dengan judul **“Rancang Bangun Tomografi Kapasitansi Listrik dengan Sensor Tersegmentasi dan Berperisau untuk Deteksi Benda Dalam Pipa”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2017

Ardian Wardhana
NRP 2212100098

**RANCANG BANGUN TOMOGRAFI
KAPASITANSI LISTRIK DENGAN SENSOR
TERSEGMENTASI DAN BERPERISAI UNTUK
DETEKSI BENDA DALAM PIPA**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Elektronika
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dr. Muhammad Rival, ST, MT
NIP. 196904261994031003

Fajar Budiman, ST, M.Sc
NIP. 198607072614041001

**JURUSAN
TEKNIK ELEKTRO
SURABAYA
JANUARI, 2017**

RANCANG BANGUN TOMOGRAFI KAPASITANSI LISTRIK DENGAN SENSOR TERSEGMENTASI DAN BERPERISAI UNTUK DETEKSI BENDA DALAM PIPA

Nama : Ardian Wardhana
Dosen Pembimbing I : Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.
Dosen Pembimbing II : Fajar Budiman, ST., M.Sc.

ABSTRAK

Tomografi merupakan teknik pengamatan struktur penampang benda tanpa melakukan tindakan yang bersifat merusak atau mengubah benda yang dibutuhkan dalam penerapan industri, kesehatan maupun keamanan. Pengamatan dilakukan dengan memanfaatkan interaksi bahan dalam benda terhadap sinyal eksitasi eksternal. Hasil pengukuran digunakan untuk merekonstruksi struktur penampang internal benda.

Pada tugas akhir ini dilakukan perancangan sistem tomografi kapasitansi listrik dengan menggunakan sensor tersegmentasi dan berperisai. Tomografi kapasitansi listrik memanfaatkan informasi perbedaan nilai kapasitansi pada beberapa garis potong yang disebabkan oleh persebaran permittivitas bahan untuk merekonstruksi struktur bagian dalam benda. Konfigurasi sensor diatur dengan menggunakan multiplekser analog yang terdiri dari array switch CMOS HEF4066B. Pengukuran kapasitansi sensor dilakukan dengan metode pengukuran muatan. Sinyal hasil pengukuran dikondisikan dengan menggunakan filter *high-pass*, penguat, penyearah presisi dan perata-rata, yang kemudian didigitalkan menggunakan ADC pada mikrokontroler ATmega8A. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan komputer. Rekonstruksi citra dilakukan dengan algoritma proyeksi balik linier.

Berdasarkan hasil pengujian, sistem tomografi kapasitansi listrik dapat mendeteksi letak dan membedakan bahan benda uji. Penggunaan sensor tersegmentasi mampu meningkatkan sensitivitas pengukuran kapasitansi sebesar 2,76 kali lipat dari penggunaan sensor tunggal dengan nilai sensitivitas 0,515 V/pF. Penggunaan sensor berperisai mampu mengurangi efek gangguan lingkungan terhadap pengukuran sensor.

Hasil dari tugas akhir ini dapat diimplementasikan sebagai alat pemonitor isi pipa pada industri dengan kebutuhan regulasi yang rendah.

Kata Kunci : proyeksi balik linier, sensor tersegmentasi, tomografi kapasitansi listrik

(halaman ini sengaja dikosongkan)

**DESIGN OF ELECTRICAL CAPACITANCE
TOMOGRAPHY WITH SEGMENTED AND SHIELDED
SENSOR FOR DETECTION OF OBJECT INSIDE PIPE**

Name : Ardian Wardhana
1st Advisor : Dr. Muhammad Rivai, ST., M.T.
2nd Advisor : Fajar Budiman, S.T., M.Sc.

ABSTRACT

Tomography is a nondestructive and noninvasive cross-section imaging technique which is very useful in industrial, healthcare and security application. Observation can be performed by observing objects interaction to external excitation signal. Object is scanned by measuring capacitance value through various part of the object. The gathered information is used to reconstruct the internal structure of the object.

In this final project, an electrical capacitance tomography system is designed using segmented and shielded sensors. Electrical capacitance tomography harness the capacitance information between different measurement section caused by the different permittivity constant exhibited by different materials to reconstruct internal cross-section image of the object. The sensor configuration is controlled using analog multiplexer made by an array of HEF4066B CMOS switches. Capacitance measurement is done using charge measurement method. Measured signal is conditioned using high-pass filter, amplifier, precision rectifier and averaging filter then digitized using ADC of ATmega8A microcontroller. Image reconstruction is done using linear back-projection algorithm.

From the test result, the electrical capacitance tomography system can detect object location and differentiate object composition. The implementation of segmented sensor results in an increase of sensor sensitivity by factor of 2,76 compared to single sensor with sensitivity value of 0,515 V/pF. The implementation of shielded sensor results in the decrease of external disturbance effect on sensor measurement.

The result of this final project can be implemented in industrial application for pipe content monitoring where minimum regulation requirement is desired.

Keywords : linear back projection, segmented sensor, electrical capacitance tomography

(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan buku Tugas Akhir dengan judul **“RANCANG BANGUN TOMOGRAFI KAPASITANSI LISTRIK DENGAN SENSOR TERSEGMENTASI DAN BERPERISAI UNTUK DETEKSI BENDA DALAM PIPA”**.

Tugas Akhir ini dibuat berdasarkan teori-teori yang didapat selama mengikuti perkuliahan, berbagai literatur penunjang dan pengarahan dosen pembimbing dari awal hingga akhir pengerjaan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini banyak mengalami kendala, namun berkat bantuan, bimbingan, dan kerjasama dari berbagai pihak sehingga kendala-kendala tersebut dapat diatasi. Untuk itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan banyak terimakasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Suwardi, S.Pd dan Ibu Tukinah yang senantiasa memberi doa, nasihat, motivasi dan dukungan penuh. Serta tidak lupa kepada adik Armelia Kindi Wardhani yang selalu menjadi sumber semangat dan motivasi.
2. Bapak Dr. Muhammad Rivai, ST., MT. dan Bapak Fajar Budiman, ST., M.Sc selaku dosen pembimbing atas bimbingan, inspirasi, pengarahan dan motivasi yang diberikan selama pengerjaan penelitian tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Hendra Kusuma, M.Eng.Sc; Bapak Ir. Tasripan, MT.; Bapak Harris Pirngadi; dan Bapak Astria Nur Irfansyah, ST., M.Eng, PhD sebagai dosen penguji atas evaluasi, arahan dan koreksi yang diberikan pada tugas akhir ini.
4. Teman-teman seperjuangan bidang studi Elektronika di lab B202, B205 dan B402 serta teman-teman angkatan 2012 Teknik Elektro ITS. Penulis menyadari bahwa pada penyusunan laporan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan-kekurangan karena keterbatasan kemampuan yang penulis miliki, walaupun demikian penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi yang membutuhkannya.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Batasan Masalah	2
1.5. Metodologi.....	2
1.6. Sistematika Penulisan	3
1.7. Relevansi	4
BAB II TEORI PENUNJANG.....	5
2.1. Kapasitansi.....	5
2.1.1 Kapasitor.....	5
2.1.2 Pengukuran Kapasitansi	6
2.2. Tomografi Kapasitansi Listrik	8
2.2.1 Sensor Tersegmentasi.....	9
2.2.2 Sensor Berperisai	10
2.2.3 Algoritma Rekonstruksi	11
2.2.3.1 Metode Proyeksi Balik Linier.....	11
2.2.3.2 Peta Sensitivitas.....	13
2.3. Pengkondisi Sinyal	14
2.3.1 Multiplexer Analog.....	14
2.3.1.1 HEF4066B.....	16
2.3.2 Generator Sinyal	17
2.3.2.1 ICL8038.....	17
2.3.3 Penguat Muatan.....	20
2.3.4 Penguat <i>Non-Inverting</i>	22
2.3.5 Filter.....	23
2.3.5.1. Filter <i>Low Pass</i>	23
2.3.5.2. Filter <i>High Pass</i>	24
2.3.5.3. Filter Aktif Sallen-Key	25

2.3.6	Penyearah Presisi	30
2.3.7	Penjumlah Analog	34
2.3.8	Penguat Operasional LF353.....	36
2.4.	Mikrokontroler Atmel ATmega8A.....	37
2.5.	Komunikasi Serial	38
2.5.1	Protokol RS232.....	38
2.5.1.1	MAX232	39
2.5.2	Adaptor USB ke Serial	39
BAB III PERANCANGAN SISTEM		41
3.1.	Diagram Blok Sistem	41
3.2.	Perancangan Perangkat Keras	41
3.2.1	Sensor Kapasitif.....	41
3.2.2	Multiplexer Analog	42
3.2.3	Generator Sinyal	44
3.2.4	Pengkondisi Sinyal	45
3.2.4.1	Penguat Muatan.....	46
3.2.4.2	Filter High Pass	46
3.2.4.3	Penguat Noninverting.....	48
3.2.4.4	Penyearah Presisi	49
3.2.4.5	Filter Low Pass.....	50
3.2.4.6	Pengurang Offset dan Penguat Noninverting	51
3.2.5	Mikrokontroler.....	52
3.2.6	Pencatu Daya	53
3.3.	Perancangan Perangkat Lunak.....	54
3.3.1	Firmware Mikrokontroler	54
3.3.1.1	Konfigurasi Sensor	55
3.3.1.2	Akuisisi Sinyal Sensor	57
3.3.1.3	Pengiriman dan Penerimaan Data	57
3.3.2	Peta Sensitivitas	57
3.3.2.1	Simulasi Sensor	57
3.3.2.2	Perhitungan Peta Sensitivitas	59
3.3.3	Perangkat Lunak Rekonstruksi Citra	59
3.3.3.1	Subprogram Komunikasi Serial	60
3.3.3.2	Subprogram Pemuat Peta Sensitivitas	60
3.3.3.3	Subprogram Rekonstruksi Citra	61
3.3.3.4	Subprogram Penampil Citra	62
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA.....		65
4.1.	Sensor Kapasitif	65
4.1.1	Respons Sensor Tersegmentasi.....	65

4.1.2 Respons Sensor Berperisai	67
4.2. Pengkondisi Sinyal	68
4.2.1 Penguat Muatan.....	68
4.2.2 Filter <i>High-Pass</i>	70
4.2.3 Penyearah Presisi	72
4.2.4 Filter <i>Low-Pass</i>	73
4.2.5 Konversi AC ke DC	75
4.2.6 Respons Pengkondisi Sinyal	76
4.3. Multiplekser Analog	77
4.4. Respons Sistem.....	77
4.5. Rekonstruksi Citra	79
4.6. Selektivitas Sistem.....	80
BAB V PENUTUP.....	83
5.1. Kesimpulan.....	83
5.2. Saran	83
DAFTAR PUSTAKA.....	85
LAMPIRAN.....	89
<i>Firmware</i> Mikrokontroller	89
Perangkat Lunak Perhitungan Peta Sensitivitas	95
Perangkat Lunak Rekonstruksi Citra.....	97
BIODATA PENULIS.....	101

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 1.1	Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir	2
Gambar 2.1	Kapasitor pelat sejajar.....	6
Gambar 2.2	Rangkaian arus bolak-balik dengan kapasitor.....	7
Gambar 2.3	Sistem tomografi kapasitansi listrik.....	8
Gambar 2.4	Penampang melintang sensor tomografi	9
Gambar 2.5	Sensor tomografi kapasitif tersegmentasi	10
Gambar 2.6	Sensor tanpa perisai dan sensor berperisai.....	11
Gambar 2.7	Elektroda dalam konfigurasi eksitasi	14
Gambar 2.8	Elektroda dalam konfigurasi <i>sensing</i>	15
Gambar 2.9	Elektroda dalam konfigurasi <i>shield</i>	15
Gambar 2.10	Elektroda dalam konfigurasi <i>floating</i>	16
Gambar 2.11	Konfigurasi internal switch pada HEF4066B	16
Gambar 2.12	Konfigurasi blok dan pin HEF 4066B	17
Gambar 2.13	Blok diagram ICL8038	18
Gambar 2.14	Konfigurasi rangkaian ICL8038	19
Gambar 2.15	Penguat muatan.....	21
Gambar 2.16	Penguat <i>Non-Inverting</i>	22
Gambar 2.17	Filter pasif <i>low pass</i> orde 1	23
Gambar 2.18	Filter pasif <i>high pass</i> orde 1	25
Gambar 2.19	Bentuk umum filter Sallen-Key	26
Gambar 2.20	Blok fungsi transfer rangkaian filter	27
Gambar 2.21	Filter <i>low pass</i> orde dua	28
Gambar 2.22	Filter <i>high pass</i> orde dua.....	29
Gambar 2.23	Penyearah presisi	31
Gambar 2.24	Penjumlah analog.....	34
Gambar 2.25	Konfigurasi pin LF353.....	36
Gambar 2.26	Struktur dan <i>peripheral</i> ATmega8A	37
Gambar 2.27	Struktur blok MAX232	38
Gambar 2.28	Konfigurasi pin MAX 232	39
Gambar 2.29	Adaptor USB ke Serial.....	39
Gambar 3.1	Diagram blok perangkat keras ECT	41
Gambar 3.2	Implementasi sensor kapasitif.....	42
Gambar 3.3	Skema rangkaian papan switch analog	43
Gambar 3.4	Implementasi rangkaian papan switch analog.....	43

Gambar 3.5	Skema rangkaian generator sinyal	44
Gambar 3.6	Implementasi generator sinyal	44
Gambar 3.7	Diagram blok rangkaian pengkondisi sinyal	45
Gambar 3.8	Implementasi rangkaian pengkondisi sinyal	45
Gambar 3.9	Skema rangkaian penguat muatan	46
Gambar 3.10	Skema rangkaian filter <i>high pass</i>	47
Gambar 3.11	Skema rangkaian penguat <i>noninverting</i>	49
Gambar 3.12	Skema rangkaian penyearah presisi	50
Gambar 3.13	Skema rangkaian filter <i>low pass</i>	50
Gambar 3.14	Skema rangkaian pengurang offset dan penguat	52
Gambar 3.15	Skema rangkaian mikrokontroller	52
Gambar 3.16	Skema rangkaian pencatu daya	53
Gambar 3.17	Diagram blok <i>firmware</i> mikrokontroller	54
Gambar 3.18	Diagram blok akuisisi data dan komunikasi	56
Gambar 3.19	Model sensor pada perangkat lunak simulasi	58
Gambar 3.20	Hasil simulasi medan listrik sensor	58
Gambar 3.21	Peta sensitivitas untuk pasangan elektroda ke-1	59
Gambar 3.22	Diagram blok perangkat lunak rekonstruksi citra	60
Gambar 3.23	Diagram blok algoritma proyeksi balik linier	61
Gambar 3.24	Implementasi perangkat lunak rekonstruksi citra	63
Gambar 4.1	Metode pengujian sensor tersegmentasi	66
Gambar 4.2	Pengujian sensor berperisai	67
Gambar 4.3	Rangkaian pengujian penguat muatan	69
Gambar 4.4	Karakteristik C-V penguat muatan	70
Gambar 4.5	Respons frekuensi filter high-pass	71
Gambar 4.6	Karakteristik transfer penyearah presisi	72
Gambar 4.7	Respons dinamis penyearah presisi	73
Gambar 4.8	Respons frekuensi filter low-pass	74
Gambar 4.9	Karakteristik transfer konverter AC ke DC	76
Gambar 4.10	Respons rangkaian pengkondisi sinyal	77
Gambar 4.11	Hasil pengukuran sensor kosong	78
Gambar 4.12	Hasil pengukuran sensor berisi air	78
Gambar 4.13	Perbandingan posisi benda dan hasil rekonstruksi	79
Gambar 4.14	Perbandingan bentuk benda dan hasil rekonstruksi	80

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1	Nilai permittivitas relatif bahan dielektrik..... 6
Tabel 3.1	Urutan konfigurasi sensor..... 55
Tabel 3.2	Konfigurasi bit shift register..... 56
Tabel 4.1	Respons sensor tunggal 65
Tabel 4.2	Respons sensor tersegmentasi 66
Tabel 4.3	Perbandingan respons sensor..... 67
Tabel 4.4	Respons sensor terhadap gangguan luar 68
Tabel 4.5	Efek gangguan luar pada citra rekonstruksi..... 68
Tabel 4.6	Karakteristik C-V penguat muatan 69
Tabel 4.7	Respons frekuensi filter high-pass..... 71
Tabel 4.8	Karakteristik transfer penyearah presisi 72
Tabel 4.9	Respons frekuensi filter low-pass 74
Tabel 4.10	Respons rangkaian konversi AC ke DC 75
Tabel 4.11	Respons rangkaian pengkondisi sinyal..... 76
Tabel 4.14	Pengujian respons bahan homogen..... 81
Tabel 4.15	Pengujian respons bahan nonhomogen..... 82

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tomografi merupakan teknik pengamatan struktur penampang benda tanpa melakukan tindakan yang bersifat merusak atau mengubah benda. Kemampuan melakukan pengamatan penampang benda tanpa merusak atau mengubah fisik benda dibutuhkan dalam penerapan industri, kesehatan maupun keamanan.

Pengamatan dapat dilakukan dengan memanfaatkan interaksi bahan dalam benda terhadap sinyal eksitasi eksternal. Dengan mengamati perubahan sinyal yang diakibatkan oleh benda, komposisi dan struktur benda dapat direkonstruksi. Terdapat beberapa metode tomografi berdasarkan sinyal eksitasi yang digunakan, antara lain tomografi optik menggunakan sinar tampak, tomografi elektromagnetik menggunakan gelombang radio, tomografi radiologi menggunakan sinar-X atau sinar gamma, dan tomografi listrik menggunakan deteksi kapasitansi atau induktansi.

Tomografi kapasitif memanfaatkan informasi distribusi kapasitansi yang disebabkan oleh perbedaan nilai permittivitas bahan untuk merekonstruksi struktur bagian dalam benda. Benda dipindai dengan cara mengukur nilai kapasitansi yang ditimbulkan oleh benda pada sepasang sensor kapasitor pelat sejajar. Pengukuran dilakukan berkali-kali pada garis potong yang berbeda-beda sehingga diperoleh data kapasitansi yang meliputi seluruh bagian penampang benda. Hasil pengukuran kapasitansi diolah dengan algoritma rekonstruksi citra sehingga didapatkan representasi penampang benda dalam bentuk citra dua dimensi.

Untuk mendapatkan hasil pemindaian yang memiliki tingkat resolusi dan akurasi tinggi, diperlukan konstruksi sensor dengan komponen parasitik rendah, pengukuran kapasitansi yang akurat dan algoritma rekonstruksi citra yang baik. Pengembangan-pengembangan yang telah dilakukan antara lain adalah penggunaan sensor tersegmentasi, sensor berperisai, pengukuran dan sensor differensial, serta algoritma rekonstruksi iteratif.

Karena menggunakan pengukuran kapasitansi, tomografi elektronik kapasitif memiliki kelebihan berupa penggunaan sinyal eksitasi yang tidak mengakibatkan bahaya radiasi, dapat mengamati

bahan yang tidak tembus radiasi (*opaque*), serta implementasi yang relatif sederhana.

Aplikasi dari tomografi kapasitansi listrik antara lain adalah untuk pengamatan isi dan bahan yang mengalir pada pipa, terutama pada bahan yang mungkin terjadi kontaminasi dan segregasi.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah perancangan sensor, rangkaian pengukur kapasitansi, rangkaian pembangkit sinyal eksitasi dan perancangan perangkat lunak rekonstruksi citra penampang.

1.3. Tujuan

Berdasarkan pada rumusan masalah, maka tujuan yang ingin dicapai dalam perancangan ini adalah purwarupa alat tomografi elektronik kapasitif yang mampu merekonstruksi struktur internal benda dengan resolusi yang lebih baik.

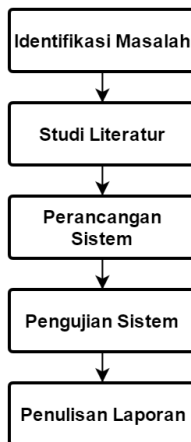
1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini dirinci sebagai berikut.

1. Pengukuran dilakukan pada benda tidak bergerak

1.5. Metodologi

Langkah-langkah yang dikerjakan pada tugas akhir ini dapat dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir

IDENTIFIKASI PERMASALAHAN

Identifikasi masalah yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi studi tentang pembangkitan sinyal dan pengkondisian sinyal pada sensor kapasitif, desain sensor, serta sistem akuisisi data untuk array sensor kapasitif pada sistem tomografi kapasitansi listrik.

STUDI LITERATUR

Tahap studi literatur meliputi beberapa hal berikut ini.

1. Mempelajari konsep tomografi kapasitansi listrik.
2. Mempelajari karakteristik sensor.
3. Mempelajari sistem akuisisi data
4. Mempelajari algoritma rekonstruksi citra.

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan dasar teori yang menunjang dalam penulisan Tugas Akhir. Dasar teori ini dapat diambil dari buku-buku, jurnal, dan artikel-artikel di internet dan forum-forum diskusi internet yang relevan.

PERANCANGAN SISTEM

Sistem yang dirancang terdiri dari dua bagian utama, yaitu sistem perangkat keras akuisisi data dan sistem perangkat lunak pengolahan data. Pada bagian sistem akuisisi data terdapat generator sinyal, sensor kapasitif, multiplekser analog dan pengkondisi sinyal. Perangkat lunak pemrosesan data terdiri dari pengolahan data rekonstruksi citra dan penampilan citra hasil rekonstruksi.

PENGUJIAN SISTEM

Pengujian dilakukan untuk melakukan verifikasi performa blok-blok sistem dan keseluruhan sistem tomografi kapasitansi listrik dalam mengidentifikasi benda.

PENULISAN LAPORAN TUGAS AKHIR

Tahap ini adalah tahap terakhir dari proses pengerjaan tugas akhir ini. Tahap ini dimulai saat pengambilan data. Laporan tugas akhir ini berisi tentang seluruh kegiatan yang dilakukan selama mengerjakan tugas akhir.

1.6. Sistematika Penulisan

Buku tugas akhir disusun dengan penjelasan mengenai sistem yang dibuat yang terjabarkan dalam lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut.

BAB I: PENDAHULUAN

Bagian ini menjelaskan tentang dasar penyusunan tugas akhir yang terdiri dari beberapa sub bagian, yaitu latar belakang, permasalahan dan batasannya, tujuan yang diharapkan, metodologi pengerjaan tugas akhir, relevansi serta sistematika penulisan tugas akhir ini.

BAB II: TEORI PENUNJANG

Bagian ini menjelaskan tentang metode-metode dan pengujian yang pernah diteliti sebelumnya. Selain itu, pada bagian ini juga dijelaskan dasar-dasar teori yang dibutuhkan dalam pengerjaan tugas akhir ini, meliputi teori yang terkait dengan pengembangan sistem tomografi kapasitansi listrik.

BAB III: PERANCANGAN SISTEM

Bagian ini berisi perancangan sistem yang terdiri dari dua bagian utama, yaitu sistem akuisisi data dan sistem pemrosesan data. Bagian akuisisi data terdiri dari bagan-bagan dari sistem yang digunakan untuk pengambilan data, sedangkan bagian pemrosesan data terdiri dari program untuk mengolah data dan rekonstruksi citra.

BAB IV: PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Bagian ini akan menjelaskan mengenai performa dan analisis sistem tomografi kapasitansi listrik.

BAB V: PENUTUP

Bagian ini merupakan bagian akhir yang berisikan kesimpulan dan saran untuk pengembangan rancangan sistem tomografi kapasitansi listrik berikutnya.

1.7. Relevansi

Matakuliah yang mendukung tugas akhir ini adalah Rangkaian Listrik, Rangkaian Elektronik, Rangkaian Digital, Perancangan Sistem Elektronika Analog, Sensor dan Aktuator, Teknik Akuisisi Data dan beberapa referensi tentang analisis kapasitansi. Hasil akhir penelitian ini berupa *prototype* yang diharapkan dapat dikembangkan dan diimplementasikan sebagai alat pengamatan penampang benda dalam pipa.

BAB II

TEORI PENUNJANG

Teori penunjang dalam bab ini menjabarkan tentang berbagai teori yang dapat digunakan sebagai penunjang pengembangan sistem tomografi kapasitansi listrik sedangkan pada bagian tinjauan pustaka dijabarkan tentang sistem yang pernah dikembangkan dan diimplementasikan dalam penelitian-penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini.

2.1. Kapasitansi

2.1.1 Kapasitor

Kapasitor memiliki konfigurasi dasar berupa dua buah pelat konduktor yang dipisahkan oleh bahan dielektrik nonkonduktif. Ketika kedua pelat konduktor diberi beda potensial, pelat memiliki muatan listrik dengan jumlah yang sama namun polaritasnya berlawanan. Muatan pada pelat membangkitkan medan listrik pada bahan dielektrik.

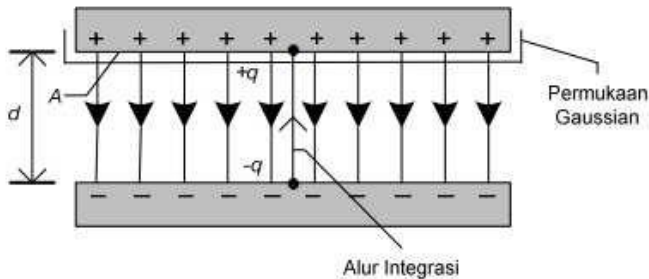
Kemampuan kapasitor menyimpan muatan antara dua keping konduktor didefinisikan sebagai perbandingan antara besar muatan total dalam pelat konduktor (Q) terhadap beda potensial antara pelat konduktor (V).

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

Kapasitansi dari suatu konstruksi kapasitor merupakan fungsi dari geometri kapasitor dan sifat bahan dielektrik yang digunakan. Permittivitas merupakan suatu besaran fisik yang menyatakan resistansi bahan dielektrik terhadap pembentukan medan listrik. Permittivitas memiliki symbol ϵ dan satuan farad per meter (F/m). Nilai permittivitas suatu bahan menentukan seberapa kuat medan listrik yang ditimbulkan oleh suatu muatan listrik.

Kapasitansi berbanding lurus dengan luas keping konduktor yang berhadapan (A), dan berbanding terbalik dengan jarak antar kedua keping konduktor (d). Kapasitansi juga berbanding lurus dengan permittivitas bahan dielektrik (ϵ) yang digunakan untuk memisahkan kedua pelat [1].

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.2)$$



Gambar 2.1 Kapasitor pelat sejajar

Pada umumnya, nilai permitivitas suatu bahan dinyatakan dalam bentuk permittivitas relatif (ϵ_r), yaitu rasio antara permittivitas bahan terhadap permittivitas ruang hampa (ϵ_0). Ruang hampa memiliki nilai permittivitas sebesar $8,85 \times 10^{-12}$ F/m. Bahan-bahan dielektrik memiliki nilai permittivitas yang berbeda-beda sehingga permittivitas dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis bahan [2].

Persamaan kapasitansi dapat dinyatakan dalam bentuk permittivitas relatif, yaitu rasio antara permittivitas bahan terhadap permittivitas ruang hampa

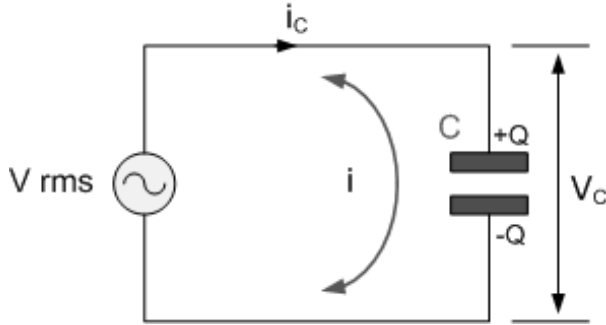
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.3)$$

2.1.2 Pengukuran Kapasitansi

Kapasitansi antar pelat-pelat elektroda diukur dengan menggunakan rangkaian pengukuran kapasitansi. Pengukuran kapasitansi dapat dilakukan dengan mengukur impedansi kapasitor.

Tabel 2.1 Nilai permittivitas relatif bahan dielektrik

Bahan	Permittivitas Relatif
Udara	1
Kertas	3,85
Beton	4,5
Karet	7
Ammonia	17
Methanol	30
Air	80



Gambar 2.2 Rangkaian arus bolak-balik dengan kapasitor

Pengukuran dilakukan dengan mengukur besarnya arus yang melewati kapasitor, dan tegangan yang membentangi kapasitor ketika dieksitasi oleh sumber tegangan bolak-balik pada frekuensi tertentu.

Arus listrik (i_c) yang mengalir pada kapasitor C dapat dihitung dengan persamaan

$$i_c = C \frac{dv_c(t)}{dt} \quad (2.4)$$

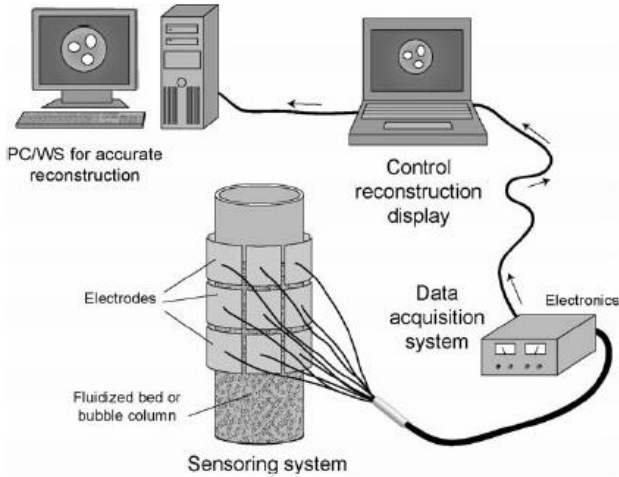
Ketika kapasitor dieksitasi dengan gelombang sinusoidal $v(t) = V_p \sin(\omega t)$ maka perbandingan arus yang mengalir dan tegangan yang membentangi kapasitor sesaat pada t dapat dinyatakan dalam persamaan

$$\frac{v_c(t)}{i_c(t)} = \frac{V_p \sin(\omega t)}{\omega C V_p \cos(\omega t)} \quad (2.5)$$

$$Z = -j \frac{1}{\omega C} \quad (2.6)$$

Dengan mengetahui nilai Z dari pengukuran arus pada elektroda dan nilai frekuensi eksitasi dari generator sinyal, nilai kapasitansi antara kedua pelat elektroda dapat diketahui dengan persamaan

$$C = -j \frac{1}{\omega Z} \quad (2.7)$$



Gambar 2.3 Sistem tomografi kapasitansi listrik

2.2. Tomografi Kapasitansi Listrik

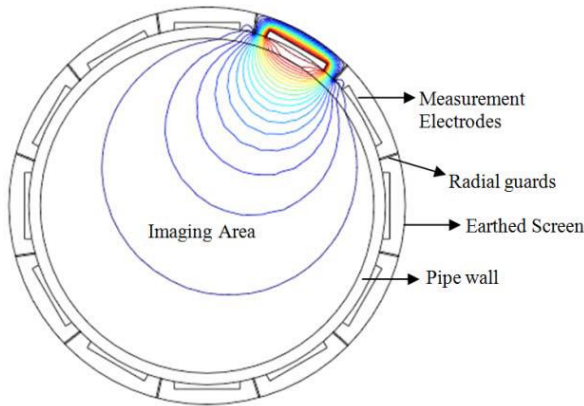
Tomografi merupakan metode pencitraan penampang (potongan) benda dengan melakukan rekonstruksi non-destruktif dan non-invasif. Tomografi Kapasitansi Listrik menggunakan informasi distribusi spasial kapasitansi antara dua pasang keping konduktor untuk merekonstruksi komposisi internal benda [3].

Sistem perangkat keras tomografi kapasitif terdiri dari sensor kapasitif, multiplekser analog, pengukur kapasitansi dan konverter analog ke digital [4].

Komponen sensor yang digunakan berupa pelat-pelat konduktor yang disusun melingkar mengelilingi benda uji. Dengan melakukan pengukuran terhadap berbagai kombinasi pelat konduktor, dapat didapatkan informasi nilai kapasitansi untuk potongan-potongan tertentu.

Berdasarkan persamaan kapasitor, nilai kapasitansi antara dua buah pelat konduktor ditentukan oleh luas, jarak dan permittivitas benda. Untuk suatu pasangan elektroda (x,y) yang membentangi bidang Γ , kapasitansi yang terukur mengikuti persamaan:

$$C = -\frac{1}{V} \iint_{\Gamma} \varepsilon_{(x,y)} \nabla v_{(x,y)} d\Gamma \quad (2.8)$$



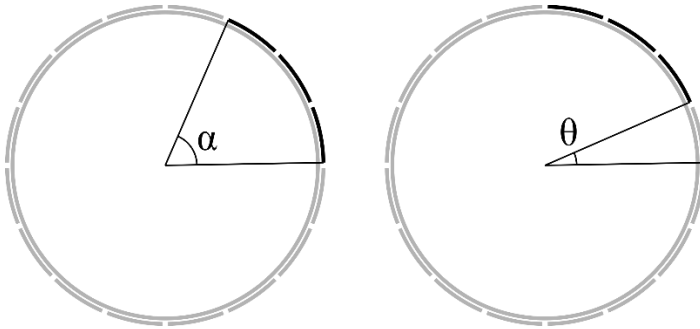
Gambar 2.4 Penampang melintang sensor tomografi [5]

Gambar 2.4 menunjukkan penampang melintang persebaran medan listrik pada sensor tomografi ketika salah satu elektroda dieksitasi tegangan listrik (V) [5]. Perbedaan nilai permittivitas pada *imaging area* ($\epsilon_{(x,y)}$) yang disebabkan oleh perbedaan komposisi beda menyebabkan perubahan pola dan intensitas medan listrik ($v_{(x,y)}$) pada benda. Hal tersebut menyebabkan perbedaan nilai kapasitansi yang terukur pada pasangan-pasangan pelat konduktor [4].

Desain sensor merupakan kompromi antara sensitivitas dan resolusi. Untuk mendapatkan sensitivitas yang baik, pelat elektroda harus memiliki luas permukaan sebesar mungkin sehingga didapatkan pengukuran kapasitansi dengan nilai sinyal yang lebih besar. Sedangkan untuk mendapatkan resolusi yang baik, jumlah pelat elektroda harus sebanyak mungkin sehingga dapat diperoleh pengukuran kapasitansi yang lebih rapat.

2.2.1 Sensor Tersegmentasi

Resolusi pada sistem tomografi kapasitansi listrik merupakan hasil kompromi antara jumlah sensor dan luas permukaan sensor. Untuk system dengan diameter yang sama, penambahan jumlah sensor untuk meningkatkan resolusi pengukuran kapasitansi akan berakibat pada berkurangnya luas permukaan tiap pelat sensor yang dapat digunakan untuk mengukur kapasitansi.



Gambar 2.5 Sensor tomografi kapasitif tersegmentasi

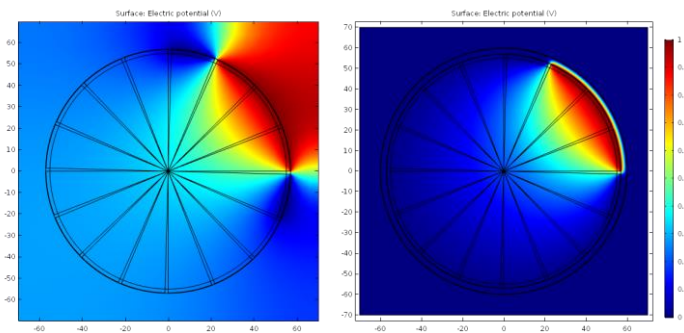
Berkurangnya luas permukaan pelat sensor berakibat pada berkurangnya nilai kapasitansi yang timbul antara dua sensor saat dilakukan pengukuran. Nilai kapasitansi yang lebih kecil membutuhkan rangkaian pengkondisi dan akuisisi data yang lebih sensitif dan memiliki tingkat derau yang rendah sehingga sinyal tidak tenggelam oleh gangguan derau.

Penggunaan sensor tersegmentasi merupakan salah satu metode untuk mendapatkan jumlah pengukuran yang besar tanpa mengorbankan luas permukaan sensor (α). Pada sensor tersegmentasi, sensor dibagi menjadi pelat-pelat elektroda kecil yang digabungkan menjadi satu saat dilakukan pengukuran. Dengan mengubah konfigurasi pelat-pelat yang digabungkan, dapat dilakukan pengukuran kapasitansi dengan selisih sudut (θ) yang lebih kecil dari penggunaan sensor tunggal [6].

2.2.2 Sensor Berperisai

Nilai kapasitansi antara dua pelat elektroda bergantung pada persebaran nilai permittivitas dielektrik dan persebaran medan listrik pada bahan dielektrik. Tomografi kapasitif menggunakan informasi persebaran permittivitas dielektrik sehingga untuk mendapatkan pengukuran yang akurat, gangguan terhadap persebaran medan listrik harus dibatasi serendah mungkin [7].

Salah satu metode penguangan gangguan lingkungan terhadap persebaran medan listrik sensor adalah dengan menggunakan perisai yang dihubungkan dengan referensi (*ground*) sinyal.



Gambar 2.6 Sensor tanpa perisai dan sensor berperisai

2.2.3 Algoritma Rekonstruksi

Terdapat beberapa algoritma rekonstruksi citra dari data hasil pengukuran kapasitansi. Algoritma yang dipilih pada umumnya merupakan kompromi antara kompleksitas perhitungan matematis dan keakuratan hasil rekonstruksi yang diinginkan.

Distribusi medan listrik yang bersifat nonlinier dan sedikitnya jumlah pengukuran dibandingkan dengan jumlah piksel yang harus direkonstruksi merupakan kendala besar dalam proses rekonstruksi citra. Untuk memecahkan masalah, pada umumnya digunakan dua pendekatan yaitu metode proyeksi balik linier dan metode optimasi.

2.2.3.1 Metode Proyeksi Balik Linier

Pada metode proyeksi balik linier (*linear back projection*), hasil pengukuran kapasitansi diproyeksikan pada matriks sensor sehingga didapatkan citra dua dimensi dari persebaran permittivitas bahan yang diobservasi. Metode proyeksi balik linier melakukan perhitungan distribusi permittivitas dengan melakukan pemetaan linier hasil pengukuran kapasitansi dan matrik sensitivitas.

Proses rekonstruksi citra tomografi kapasitansi meliputi dua tahap komputasi, yaitu *forward problem* dan *inverse problem*. *Forward problem* menghitung distribusi potensial yang disebabkan oleh adanya distribusi permittivitas, sedangkan *inverse problem* menghitung distribusi permittivitas berdasarkan hasil pengukuran kapasitansi. Hasil dari

penyelesaian *inverse problem* pada umumnya disajikan dalam bentuk citra dua dimensi, sehingga proses tersebut disebut sebagai proses rekonstruksi citra [4].

Pada forward problem, nilai kapasitansi yang terukur pada pasangan-pasangan elektroda sensor dapat dinyatakan sebagai fungsi terhadap distribusi permittivitas dan peta sensitivitas [8].

$$C_{ij} = \iint_{\Gamma} \varepsilon(x, y) S_{ij}(x, y) dx dy \quad (2.9)$$

C_{ij} merupakan nilai kapasitansi antara pasangan elektroda i dan j , $\varepsilon(x, y)$ merupakan nilai permittivitas bahan pada koordinat (x, y) , $S_{ij}(x, y)$ merupakan nilai sensitivitas koordinat (x, y) untuk pasangan elektroda i - j , dan Γ merupakan permukaan elektroda.

Persamaan dapat dilinearisasi dan dinyatakan dalam bentuk diskrit sebagai

$$C = G S \quad (2.10)$$

C merupakan matriks kapasitansi dengan dimensi sebanyak jumlah pengukuran kombinasi pasangan-pasangan elektroda, G merupakan matriks distribusi permittivitas bahan dan S merupakan peta sensitivitas.

Inverse problem dari persamaan tersebut dapat direkonstruksi dengan persamaan dasar invers matriks

$$G = C S^{-1} \quad (2.11)$$

Persamaan tidak dapat diselesaikan secara analitik karena jumlah pengukuran yang dilakukan untuk C jauh lebih sedikit dari jumlah piksel pada G . Perhitungan distribusi permittivitas dapat dilakukan dengan melakukan pendekatan menggunakan transpos matriks peta sensitivitas

$$\hat{G} = C S^T \quad (2.12)$$

Metode proyeksi balik linier menggunakan persamaan penjumlahan linier tiap piksel yang dipengaruhi oleh hasil pengukuran dengan pembobotan dari peta sensitivitas. Nilai

permittivitas pada piksel x,y ($G(x,y)$) ditentukan berdasarkan persamaan 2.13 [9].

$$G(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N S_{i,j}(x, y) C_{i,j}}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N S_{i,j}(x, y)} \quad (2.13)$$

$S_{i,j}(x,y)$ merupakan nilai sensitivitas pada piksel x,y untuk pasangan elektroda i dan j . $C_{i,j}$ merupakan nilai hasil pengukuran kapasitansi pada pasangan elektroda i dan j . m dan n merupakan jumlah elektroda yang digunakan sebagai sumber eksitasi dan pengukuran kapasitansi (*sense*) pada proses pemindaian [10].

2.2.3.2 Peta Sensitivitas

Peta sensitivitas merupakan pemetaan nilai respons suatu posisi piksel pada bidang pengukuran kapasitansi terhadap perubahan nilai permittivitas. Semakin besar nilai sensitivitas suatu piksel, semakin besar pengaruh perubahan permittivitas piksel tersebut terhadap nilai kapasitansi yang terukur pada pasangan elektroda.

Peta sensitivitas dihitung untuk setiap piksel pada setiap pasangan elektroda yang digunakan sebagai pasangan pengukuran kapasitansi.

Terdapat dua metode penentuan peta sensitivitas, yaitu dengan melakukan pengukuran langsung dan melakukan perhitungan berdasarkan simulasi respons sensor.

Penentuan dengan metode pengukuran dilakukan dengan mengubah nilai permittivitas pada tiap piksel dan mengukur perubahan nilai kapasitansi pada elektroda sensor. Metode ini memerlukan pemosisian benda yang presisi dan pengukuran kapasitansi yang sensitif untuk mendapatkan peta sensitivitas yang baik.

Penentuan dengan metode simulasi dilakukan dengan menghitung persebaran medan listrik yang disebabkan oleh elektroda yang dikenai sumber eksitasi tegangan. Nilai sensitivitas dihitung dengan persamaan 2.14 [11].

$$S_{ij}(x, y) = - \int_{p(x,y)} \frac{\nabla \phi_i}{A_i} \frac{\nabla \phi_j}{B_j} dx dy \quad (2.14)$$

ϕ_i merupakan potensial medan listrik yang ditimbulkan oleh elektroda i yang dieksitasi, sedangkan ϕ_j merupakan potensial medan listrik yang ditimbulkan oleh elektroda j yang dieksitasi.

2.3. Pengkondisi Sinyal

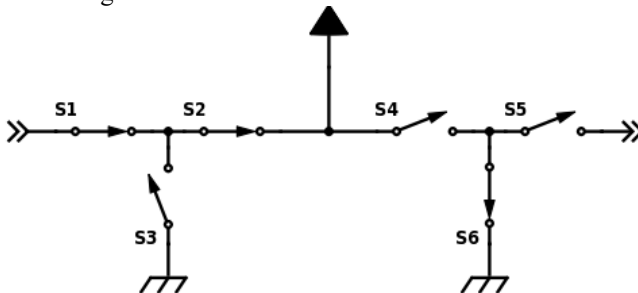
Pengkondisi sinyal merupakan rangkaian yang berfungsi untuk mengkondisikan sinyal yang didapatkan dari sumber agar dapat diolah lebih lanjut oleh perangkat akuisisi data. Pengkondisian sinyal pada umumnya meliputi penguatan sinyal, *filtering*, kompensasi offset/bias, dan linearisasi.

2.3.1 Multiplexer Analog

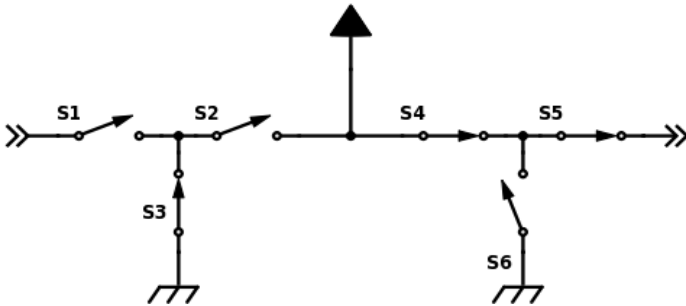
Prinsip dasar dari tomografi kapasitif adalah pengukuran nilai kapasitansi dari berbagai konfigurasi pasangan elektroda. Sistem pengukuran harus dapat mengakomodasi sehingga tiap elektroda dapat berfungsi sebagai sumber eksitasi, elemen *sensing*, dan perisai.

Salah satu topologi rangkaian yang dapat mengakomodasi kebutuhan tersebut adalah rangkaian saklar T ganda. Rangkaian saklar T ganda terdiri dari enam buah saklar untuk tiap satu kanal sensor yang dikonfigurasi membentuk huruf T.

Pada konfigurasi sumber eksitasi Gambar 2.7, saklar S1, S2 dan S6 dalam posisi tertutup, sedangkan saklar S3, S4 dan S5 dalam keadaan terbuka. S1 dan S2 menghubungkan elektroda ke sumber eksitasi, sedangkan S6 menghubungkan titik tengah T kanan ke ground.



Gambar 2.7 Elektroda dalam konfigurasi eksitasi

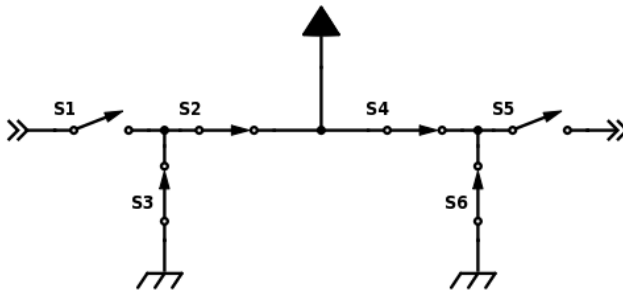


Gambar 2.8 Elektroda dalam konfigurasi *sensing*

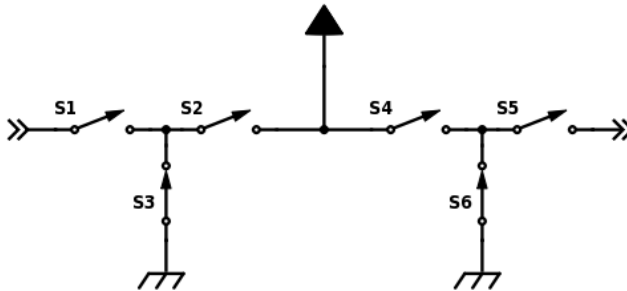
Pada konfigurasi *sensing* Gambar 2.8, saklar S3, S4 dan S5 dalam posisi tertutup, sedangkan saklar S1, S2 dan S6 dalam posisi terbuka. Pada konfigurasi ini, S4 dan S5 menghubungkan elektroda ke rangkaian akuisisi data sedangkan S3 menghubungkan titik tengah saklar T kiri ke ground.

Pada konfigurasi *grounded shield* Gambar 2.9, saklar S2, S3, S4 dan S6 dalam posisi tertutup untuk menghubungkan elektroda ke ground. Saklar S1 dan S5 dalam posisi terbuka untuk mengisolasi elektroda dari rangkaian sumber maupun rangkaian akuisisi data. Pada konfigurasi ini, resistansi elektroda ke *ground* memiliki nilai yang rendah karena terdapat dua buah jalur paralel yang menghubungkan elektroda ke ground.

Pada konfigurasi *floating* Gambar 2.10, saklar S3 dan S6 dalam posisi tertutup, sedangkan saklar S1, S2, S4 dan S5 dalam posisi terbuka. Pada konfigurasi ini, elektroda dalam keadaan impedansi tinggi.



Gambar 2.9 Elektroda dalam konfigurasi *shield*

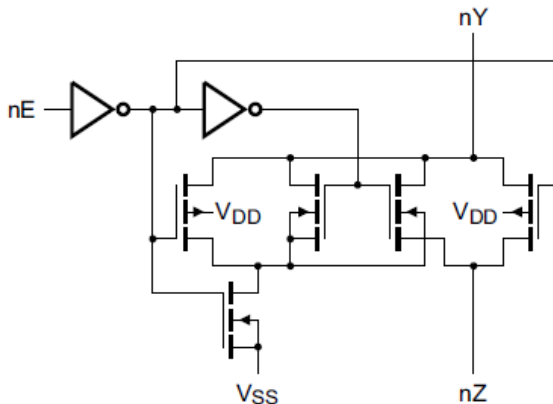


Gambar 2.10 Elektroda dalam konfigurasi *floating*

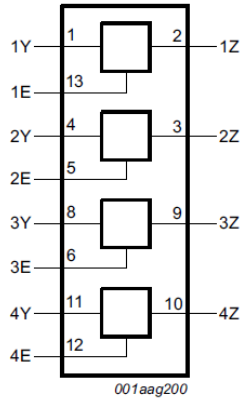
Konfigurasi saklar T memiliki kelebihan berupa *stray capacitance* dan kebocoran sinyal yang rendah ketika saklar dalam kondisi isolasi (*off*). Hal tersebut didapatkan dengan menggunakan satu buah saklar yang menghubungkan titik tengah “T” ke potensial ground sehingga efek kopel dari *off resistance* dan kapasitansi saklar *pass* dapat dimitigasi [12] [13].

2.3.1.1 HEF4066B

HEF4066B merupakan IC saklar analog buatan *NXP Semiconductor*. Tiap IC terdiri dari empat buah saklar single-pole, single-throw. Tiap saklar memiliki dua buah terminal masukan/keluaran bidireksional dan satu buah masukan kendali dengan logika CMOS.



Gambar 2.11 Konfigurasi internal switch pada HEF4066B



Gambar 2.12 Konfigurasi blok dan pin HEF 4066B

HEF4066B merupakan komponen yang ekuivalen dan kompatibel dengan saklar analog seri 4016 namun memiliki resistansi ON yang jauh lebih rendah dan konstan sepanjang tegangan operasi saklar [14].

2.3.2 Generator Sinyal

Penggunaan sinyal eksitasi untuk mengeksitasi sebuah sensor bergantung pada karakteristik turunan yang diukur dari sensor tersebut. Untuk mengukur impedansi yang perubahannya proposional terhadap perubahan kapasitansi sensor digunakan sinyal eksitasi AC. Sinyal AC digunakan karena impedansi merupakan respons frekuensi dari sensor kapasitif. Untuk menghasilkan sinyal AC digunakan rangkaian generator sinyal.

Rangkaian generator sinyal AC terbagi menjadi dua kategori: generator sinyal sinusoidal, dan generator sinyal nonsinusoidal sedangkan generator sinyal nonsinusoidal sendiri meliputi generator pulsa, dan osilator relaksasi (*relaxation oscillator*).

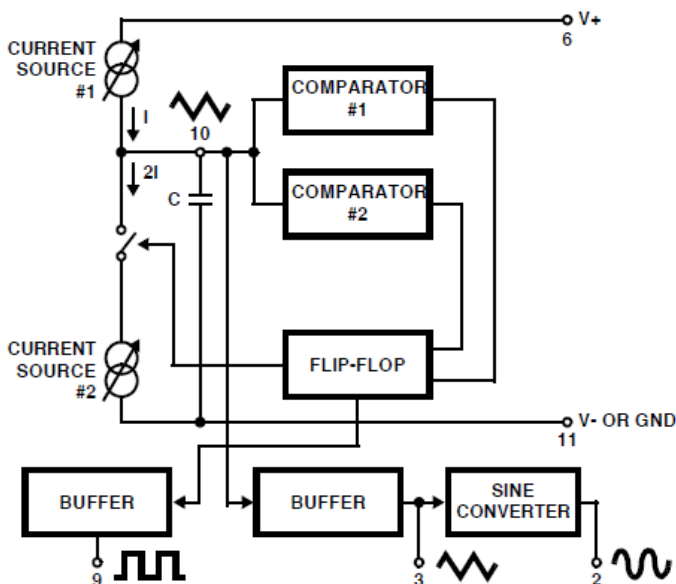
2.3.2.1 ICL8038

IC ICL8038 merupakan IC generator sinyal produksi *Intersil* yang dapat menghasilkan sinyal sinusoidal, kotak, segitiga, gigi gergaji, dan pulsa yang presisi dan tidak membutuhkan banyak komponen eksternal. Frekuensi sinyal

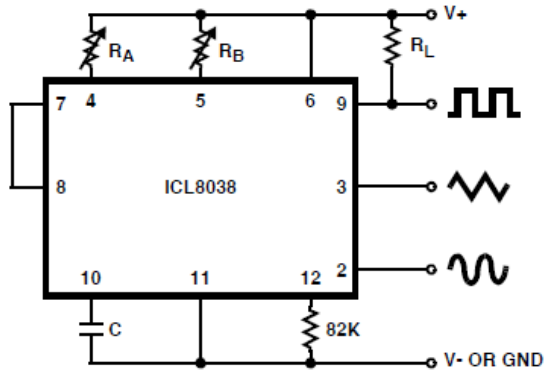
keluaran dapat disesuaikan secara eksternal mulai dari 0.001 Hz sampai lebih dari 300 kHz menggunakan kapasitor atau resistor, dan dapat melakukan modulasi frekuensi dan *sweeping* dengan tegangan catu daya eksternal [15].

Cara kerja ICL8038 dapat dijelaskan dengan menggunakan diagram blok internal pada Gambar 2.10. Saat paruh awal siklus, kapasitor eksternal *C* di-charge dengan arus sebesar I oleh sumber arus #1. Tegangan pada kapasitor akan naik secara linier hingga mencapai ambang batas atas komparator yang pada $2/3$ tegangan suplai.

Saat komparator mendeteksi tegangan kapasitor melebihi $2/3$ tegangan suplai, keluaran komparator memicu *flip-flop* untuk menutup saklar sumber arus #2 yang mengambil arus sebesar $2I$ dari node kapasitor. Selisih antara sumber arus #1 dan sumber arus #2 menyebabkan kapasitor *C* di-discharge dengan laju sebesar I hingga mencapai ambang batas bawah komparator yang ditetapkan pada $1/3$ tegangan suplai yang menyebabkan *flip-flop* membuka saklar sumber arus #2.



Gambar 2.13 Blok diagram ICL8038



Gambar 2.14 Konfigurasi rangkaian ICL8038

Proses pengisian dan pengosongan kapasitor oleh sumber arus konstan sebesar I dan $-I$ menyebabkan tegangan pada node kapasitor (10) membentuk gelombang segitiga. Sinyal ini kemudian di buffer untuk mencegah pembenanan pada kapasitor sebelum menuju rangkaian konverter sinus. Sinyal sinusoidal hasil konversi ini dapat di-trim dengan menggunakan dua buah resistor variabel untuk mendapatkan sinyal sinusoidal dengan distorsi hingga kurang dari 1%.

Arus yang dihasilkan sumber arus konstan I_1 dan I_2 dikendalikan oleh resistor eksternal R_A dan R_B , sedangkan kapasitor pewaktu merupakan kapasitor eksternal C . Frekuensi keluaran generator sinyal ditentukan berdasarkan waktu pengisian dan pengosongan kapasitor oleh kedua sumber arus dengan persamaan:

$$f = \frac{1}{\frac{2R_A C}{3} \left(1 + \frac{R_B}{2R_A - R_B} \right)} \quad (2.15)$$

Jika sinyal yang diinginkan berbentuk simetris pada sisi naik dan sisi turun, maka R_A diset sama dengan R_B . Persamaan frekuensi dapat disederhanakan menjadi:

$$f = \frac{1}{3RC} \quad (2.16)$$

2.3.3 Penguat Muatan

Elemen sensor pada sistem tomografi kapasitansi listrik merupakan sensor kapasitif sehingga memiliki impedansi yang sangat tinggi. Oleh karena itu, diperlukan penguat dengan karakteristik impedansi masukan yang tinggi untuk dapat mengolah sinyal tanpa menimbulkan efek pembebanan pada sensor [16].

Pada aplikasi sensor kapasitif, integrator Penguat operasional dengan umpanbalik kapasitif digunakan karena memiliki impedansi masukan yang tinggi. Integrator mengubah sinyal masukan berupa muatan listrik menjadi keluaran berupa sinyal tegangan, sehingga sering disebut sebagai penguat muatan.

Ketika medan listrik yang membentangi pelat sensor kapasitif mengalami perubahan intensitas, terjadi perubahan jumlah muatan yang terkumpul pada sensor dengan magnitudo perubahan sebanding dengan besarnya perubahan medan listrik yang terjadi. Adanya perubahan muatan menyebabkan tegangan pada masukan *inverting* Penguat operasional mengalami perubahan sehingga menyebabkan Penguat operasional membangkitkan keluaran dengan polaritas berlawanan. Rangkaian umpanbalik negatif memungkinkan tegangan keluaran Penguat operasional untuk mengkompensasi tegangan masukan sehingga masukan Penguat operasional kembali setimbang.

Penguat muatan memiliki prinsip kerja sebagai penguat *inverting*. Muatan masukan Q diumpankan ke masukan *inverting* penguat operasional. Muatan tersebut akan didistribusikan ke kapasitor umpanbalik [17], sehingga:

$$Q_f = Q_{in} \quad (2.17)$$

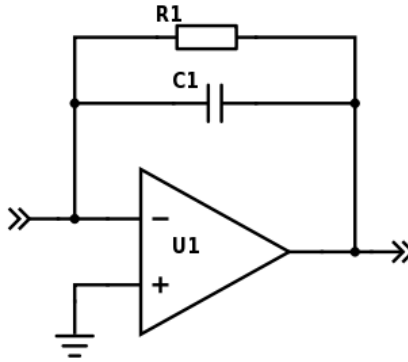
Muatan pada kapasitor dapat dinyatakan dalam persamaan

$$Q = CV \quad (2.18)$$

Substitusikan persamaan muatan 2.18 ke persamaan 2.17

$$Q_{in} = C_f V_f \quad (2.19)$$

$$V_f = \frac{Q_{in}}{C_f} \quad (2.20)$$



Gambar 2.15 Penguat muatan

Tegangan keluaran penguat merupakan jumlah antara potensial masukan *inverting* dan tegangan pada kapasitor umpanbalik

$$V_{out} = V_- - V_f \quad (2.21)$$

Pada penguat operasional ideal dengan umpanbalik negatif, kedua masukan penguat memiliki potensial yang sama, sehingga

$$V_- = V_+ \quad (2.22)$$

$$V_- = 0 \quad (2.23)$$

$$V_{out} = -\frac{Q_{in}}{C_f} \quad (2.24)$$

Jika masukan muatan didapatkan dari kapasitor C_{in} yang dieksitasi dengan sumber tegangan V_{in} , maka

$$Q_{in} = C_{in}V_{in} \quad (2.25)$$

$$V_{out} = -V_{in} \frac{C_{in}}{C_f} \quad (2.26)$$

Rangkaian umpanbalik yang bersifat kapasitif menyebabkan sinyal perubahan muatan pada masukan Penguat operasional untuk diintegrasikan pada kapasitor umpanbalik dan dikeluarkan oleh Penguat operasional sebagai sinyal tegangan.

Resistor umpanbalik yang dipasang parallel dengan kapasitor umpanbalik menyebabkan keluaran penguat muatan merupakan pulsa tegangan yang meluruh dengan konstanta waktu sebesar:

$$\tau = RC \quad (2.27)$$

2.3.4 Penguat *Non-Inverting*

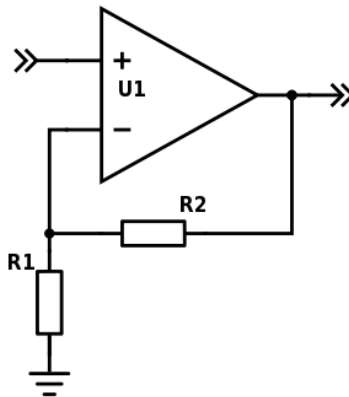
Penguat *non-inverting* merupakan konfigurasi penguat operasional yang menghasilkan sinyal keluaran sefasa dan berpolaritas sama dengan sinyal masukan. Penguat *non-inverting* memiliki karakteristik berupa impedansi masukan yang sangat tinggi [18].

Pada Gambar 2.16, rangkaian diumpani sinyal masukan pada masukan non-inverting penguat operasional. Penguat operasional ideal dengan umpanbalik negatif memiliki karakteristik impedansi masukan tak hingga dan beda potensial yang sama pada kedua masukannya, sehingga:

$$V_- = V_i \quad (2.28)$$

Tegangan pada masukan inverting penguat operasional merupakan fungsi dari tegangan keluaran yang mengalami pembagian tegangan oleh R_1 dan R_2 :

$$V_- = V_o \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.29)$$



Gambar 2.16 Penguat *Non-Inverting*

Persamaan 2.29 dapat disusun ulang dan disubstitusi dengan persamaan 2.28 sehingga didapatkan fungsi keluaran terhadap masukan

$$V_o = V_- \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (2.30)$$

$$V_o = V_i \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2.31)$$

2.3.5 Filter

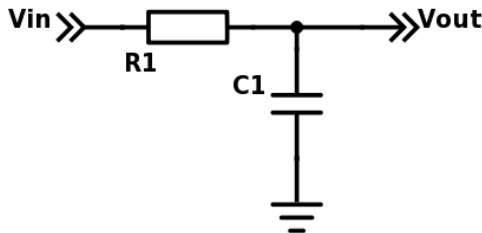
Filter merupakan rangkaian elektronik yang memiliki fungsi transfer yang meloloskan sinyal pada frekuensi atau rentang frekuensi tertentu dan menahan sinyal pada frekuensi atau rentang frekuensi lainnya.

Filter dapat dikategorikan berdasarkan metode implementasi perangkat keras menjadi dua jenis, yaitu filter analog dan filter digital. Berdasarkan respons frekuensinya, filter dikategorikan menjadi filter *low pass*, filter *band pass*, filter *band stop* dan filter *high pass*.

Rangkaian filter analog memanfaatkan perubahan parameter fisik komponen terhadap frekuensi untuk mengubah respons rangkaian terhadap sinyal dengan frekuensi yang berbeda-beda. Filter pada umumnya terdiri dari resistor dan kapasitor.

2.3.5.1. Filter Low Pass

Filter *low pass* merupakan rangkaian elektronik yang bersifat meloloskan sinyal dengan frekuensi di bawah frekuensi *cutoff* filter dan menahan sinyal dengan frekuensi di atas frekuensi *cutoff* filter.



Gambar 2.17 Filter pasif *low pass* orde 1

Pada Gambar 2.17, saat rangkaian diberi masukan berupa sinyal sinusoidal dengan fekuensi f , maka impedansi masing-masing komponen adalah:

$$Z_R = R_1 \quad (2.32)$$

$$Z_C = \frac{1}{2\pi f C_1} \quad (2.33)$$

Z_R dan Z_C membentuk rangkaian pembagi tegangan, sehingga tegangan pada keluaran rangkaian adalah:

$$V_{out} = V_{in} \frac{Z_C}{Z_R + Z_C} \quad (2.34)$$

Substitusi persamaan 2.34 dengan persamaan 2.32 dan 2.33 untuk masing-masing komponen Z_C dan Z_R

$$V_{out} = V_{in} \frac{\frac{1}{2\pi f C_1}}{R_1 + \frac{1}{2\pi f C_1}} \quad (2.35)$$

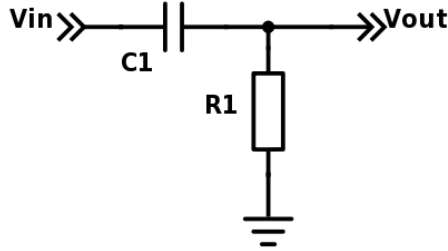
$$V_{out} = V_{in} \frac{1}{2\pi f C_1 R_1 + 1} \quad (2.36)$$

2.3.5.2. Filter *High Pass*

Filter *high pass* merupakan rangkaian elektronik yang bersifat meloloskan sinyal dengan frekuensi di atas frekuensi cutoff filter dan menahan sinyal dengan frekuensi di bawah frekuensi cutoff filter.

Pada Gambar 2.18, saat rangkaian diberi masukan berupa sinyal sinusoidal dengan fekuensi f , maka impedansi masing-masing komponen adalah:

$$Z_R = R_1 \quad (2.37)$$



Gambar 2.18 Filter pasif *high pass* orde 1

$$Z_C = \frac{1}{2\pi f C_1} \quad (2.38)$$

Z_R dan Z_C membentuk rangkaian pembagi tegangan, sehingga tegangan pada keluaran rangkaian adalah:

$$V_{out} = V_{in} \frac{Z_R}{Z_C + Z_R} \quad (2.39)$$

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_1}{\frac{1}{2\pi f C_1} + R_1} \quad (2.40)$$

$$V_{out} = V_{in} \frac{1}{\frac{1}{2\pi f C_1 R_1} + 1} \quad (2.41)$$

2.3.5.3. Filter Aktif Sallen-Key

Filter analog pasif memiliki impedansi keluaran yang tinggi sehingga filter tidak dapat dikaskade untuk mendapatkan orde filter yang lebih tinggi dengan mudah. Filter dengan orde lebih tinggi dengan impedansi keluaran yang rendah dapat direalisasikan dengan menggunakan penguat operasi pada rangkaian filter. Filter yang menggunakan penguat dikategorikan sebagai filter aktif.

Salah satu topologi filter aktif adalah topologi Sallen-Key. Pada topologi Sallen-Key, terdapat dua rangkaian RC yang dikaskade untuk mendapatkan respons filter orde dua.

Rangkaian pada Gambar 2.19 merupakan bentuk umum dari filter Sallen Key dengan tiap komponen pasif dinyatakan

dalam bentuk impedansi Z . R_3 dan R_4 digunakan untuk menentukan penguatan filter [19].

Berdasarkan hukum arus Kirchoff, total arus pada node V_f adalah nol, sehingga

$$\frac{V_i - V_f}{Z_1} + \frac{V_p - V_f}{Z_2} + \frac{V_o - V_f}{Z_4} = 0 \quad (2.42)$$

$$\frac{V_i}{Z_1} + \frac{V_p}{Z_2} + \frac{V_o}{Z_4} = \frac{V_f}{Z_1} + \frac{V_f}{Z_2} + \frac{V_f}{Z_4} \quad (2.43)$$

$$\frac{V_i Z_2 Z_4 + V_p Z_1 Z_4 + V_o Z_1 Z_2}{Z_1 Z_2 Z_4} = V_f \frac{Z_2 Z_4 + Z_1 Z_4 + Z_1 Z_2}{Z_1 Z_2 Z_4} \quad (2.44)$$

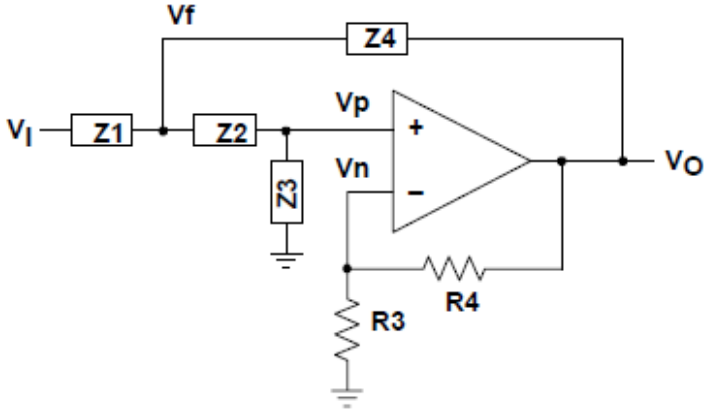
$$V_i Z_2 Z_4 + V_p Z_1 Z_4 + V_o Z_1 Z_2 = V_f (Z_2 Z_4 + Z_1 Z_4 + Z_1 Z_2) \quad (2.45)$$

Sedangkan pada node V_p :

$$\frac{V_p}{Z_3} + \frac{V_p - V_f}{Z_2} = 0 \quad (2.46)$$

$$V_f = \frac{V_p Z_2}{Z_3} + V_p \quad (2.47)$$

$$V_f = V_p \left(1 + \frac{Z_2}{Z_3} \right) \quad (2.48)$$



Gambar 2.19 Bentuk umum filter Sallen-Key

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.48 ke persamaan 2.45:

$$V_i Z_2 Z_4 + V_p Z_1 Z_4 + V_o Z_1 Z_2 = V_p \left(1 + \frac{Z_2}{Z_3} \right) (Z_2 Z_4 + Z_1 Z_4 + Z_1 Z_2) \quad (2.49)$$

$$V_i Z_2 Z_4 + V_p Z_1 Z_4 + V_o Z_1 Z_2 = V_p \frac{(Z_2 + Z_3)(Z_2 Z_4 + Z_1 Z_4 + Z_1 Z_2)}{Z_3} \quad (2.50)$$

$$V_p = \frac{V_o Z_1 Z_3 + V_i Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_4 + Z_2 Z_4 + Z_3 Z_4} \quad (2.51)$$

Untuk masukan *inverting* penguat operasional

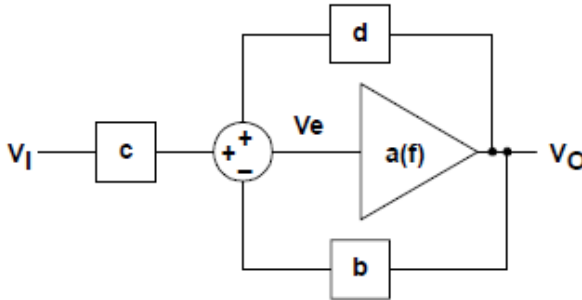
$$V_n = V_o \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad (2.52)$$

Persamaan 2.48, 2.51 dan 2.52 dapat direpresentasikan sebagai fungsi transfer rangkaian masukan dan umpanbalik untuk penguat pada Gambar 2.20 [20] sehingga:

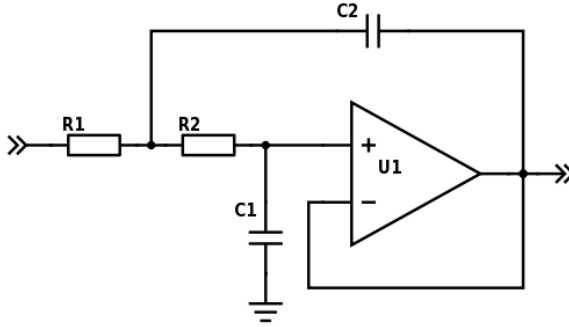
$$b = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad (2.53)$$

$$c = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_4 + Z_2 Z_4 + Z_3 Z_4} \quad (2.54)$$

$$d = \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_4 + Z_2 Z_4 + Z_3 Z_4} \quad (2.55)$$



Gambar 2.20 Blok fungsi transfer rangkaian filter



Gambar 2.21 Filter *low pass* orde dua

Dari penyelesaian fungsi transfer filter, didapatkan persamaan:

$$\frac{V_o}{V_i} = \left(\frac{c}{b}\right) \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{a(f)b} - \frac{d}{b}} \right) \quad (2.56)$$

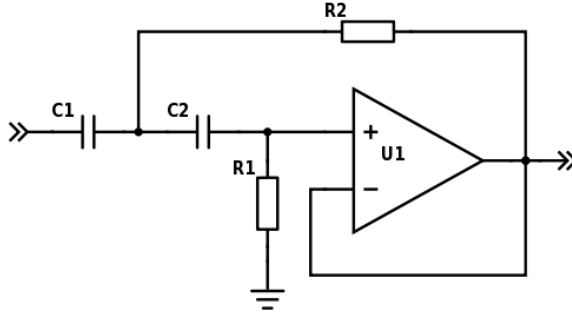
Untuk penguat operasional ideal, nilai $a(f)$ mendekati tak hingga sehingga $\frac{1}{a(f)b} \cong 0$, persamaan dapat disederhanakan menjadi:

$$\frac{V_o}{V_i} = \left(\frac{c}{b}\right) \left(\frac{1}{1 - \frac{d}{b}} \right) \quad (2.57)$$

Dengan mensubstitusikan balik persamaan 2.43, 2.54 dan 2.55 ke persamaan 2.57 maka didapat:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K}{\frac{Z_1 Z_2}{Z_3 Z_4} + \frac{Z_1}{Z_3} + \frac{Z_2}{Z_3} + \frac{Z_1(1-K)}{Z_4} + 1} \quad (2.58)$$

Pada filter *low pass* Sallen-Key, Z_1 dan Z_2 merupakan komponen resistif, sedangkan Z_3 dan Z_4 merupakan komponen kapasitif.



Gambar 2.22 Filter *high pass* orde dua

$$\begin{aligned} Z_1 = R_1 \quad Z_3 &= \frac{1}{2\pi f C_1} \\ Z_2 = R_2 \quad Z_4 &= \frac{1}{2\pi f C_2} \end{aligned} \quad (2.59)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(2\pi f)^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + 2\pi f C_1 (R_1 + R_2) + 1} \quad (2.60)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (2.61)$$

Dengan menetapkan $R_1 = mR_2$, $C_2 = nC_1$ dan penguatan tunggal, maka persamaan 2.61 dapat disederhanakan menjadi

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_1 \sqrt{mn}} \quad (2.62)$$

$$Q = \frac{\sqrt{mn}}{m + 1} \quad (2.63)$$

Pada filter *high pass* Sallen-Key, Z_1 dan Z_2 merupakan komponen kapasitif, sedangkan Z_3 dan Z_4 merupakan komponen resistif.

$$\begin{aligned} Z_3 = R_1 \quad Z_1 &= \frac{1}{2\pi f C_1} \\ Z_4 = R_2 \quad Z_2 &= \frac{1}{2\pi f C_2} \end{aligned} \quad (2.64)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\frac{1}{(2\pi f)^2 R_1 R_2 C_1 C_2} + \frac{1}{2\pi f R_1 C_1} + \frac{1}{2\pi f R_1 C_2} + 1} \quad (2.65)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (2.66)$$

Dengan menetapkan $R_1 = mR_2$, $C_2 = nC_1$ dan penguatan tunggal, maka persamaan 2.66 dapat disederhanakan menjadi

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_1 \sqrt{mn}} \quad (2.67)$$

$$Q = \frac{\sqrt{mn}}{n + 1} \quad (2.68)$$

2.3.6 Penyearah Presisi

Penyearah presisi merupakan rangkaian penyearah (konverter tegangan absolut) yang menggunakan penguat operasional untuk meng-kompensasi nonlinearitas yang disebabkan oleh komponen penyearah.

Penguat U_1 merupakan penguat pembalik yang diumpanbalik negatif melalui D_2 - R_2 dan D_1 - R_3 , sedangkan penguat U_2 merupakan penguat selisih dengan umpanbalik negatif melalui R_5 [21].

Saat masukan memiliki polaritas positif, keluaran penguat U_1 memiliki polaritas negatif sehingga dioda D_1 terpanjar maju dan dioda D_2 terpanjar mundur. Jalur umpanbalik D_1 - R_3 aktif sehingga keluaran penguat U_1 mengkompensasi titik masukan *inverting* penguat U_1 melalui resistor R_3 hingga tegangan pada titik masukan *inverting* ekuivalen dengan tegangan pada masukan *noninverting*. Pada konfigurasi ini, arus yang mengalir melalui R_1 adalah:

$$I_{R_1} = \frac{V_{in} - V_a}{R_1} \quad (2.69)$$

$$I_{R_1} = \frac{V_{in}}{R_1} \quad (2.70)$$

Karena impedansi masukan kedua penguat mendekati tak hingga, tidak terdapat arus yang mengalir dari R_1 ke masukan

inverting penguat U1 maupun masukan *noninverting* penguat U2 melalui R₂, sehingga:

$$I_{R_2} = 0 \quad (2.71)$$

$$I_{R_3} = I_{R_1} \quad (2.72)$$

Berdasarkan hukum Ohm, tegangan pada titik anoda D₂ (V_b) dan katoda D₁ (V_c) adalah

$$V_b = V_a - I_{R_2} R_2 \quad (2.73)$$

$$V_c = V_a - I_{R_3} R_3 \quad (2.74)$$

Substitusi persamaan 2.71 dan 2.72 ke persamaan 2.73 dan 2.74, maka:

$$V_b = 0 \quad (2.75)$$

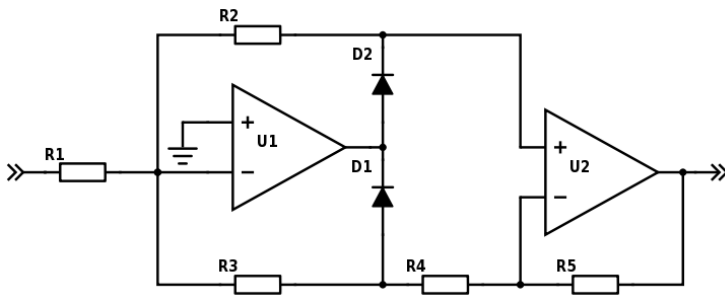
$$V_c = -\frac{V_{in} R_3}{R_1} \quad (2.76)$$

Potensial pada masukan *inverting* U₂ adalah ekivalen dengan potensial pada masukan *noninverting*, sehingga arus yang melewati R₄ adalah:

$$I_{R_4} = \frac{V_c - V_b}{R_4} \quad (2.77)$$

Arus yang melewati R₅:

$$I_{R_5} = I_{R_4} \quad (2.78)$$



Gambar 2.23 Penyearah presisi

Tegangan keluaran U_2 adalah:

$$V_o = -V_{R_5} \quad (2.79)$$

$$V_o = -I_{R_5} R_5 \quad (2.80)$$

Substitusi persamaan 2.77 ke persamaan 2.78 maka:

$$V_o = -\frac{(V_c - V_b)R_5}{R_4} \quad (2.81)$$

$$V_o = -\frac{-\frac{V_{in}R_3}{R_1}R_5}{R_4} \quad (2.82)$$

$$V_o = \frac{V_{in}R_3R_5}{R_1R_4} \quad (2.83)$$

Saat masukan memiliki polaritas negatif, keluaran penguat U_1 memiliki polaritas positif sehingga dioda D_2 terpanjar maju dan dioda D_1 terpanjar mundur. Jalur umpanbalik D_2 - R_2 aktif sehingga keluaran penguat U_1 mengkompensasi titik masukan *inverting* penguat U_1 melalui resistor R_2 hingga tegangan pada titik masukan *inverting* ekuivalen dengan tegangan pada masukan *noninverting*. Pada konfigurasi ini, arus yang mengalir melalui R_1 adalah:

$$I_{R_1} = \frac{V_{in} - V_a}{R_1} \quad (2.84)$$

$$I_{R_1} = \frac{V_{in}}{R_1} \quad (2.85)$$

Karena impedansi masukan kedua penguat mendekati tak hingga, tidak terdapat arus yang mengalir dari R_1 ke masukan *inverting* penguat U_1 maupun masukan *noninverting* penguat U_2 melalui R_2 , sehingga:

$$I_{R_3} = 0 \quad (2.86)$$

$$I_{R_2} = I_{R_1} \quad (2.87)$$

Berdasarkan hukum Ohm, tegangan pada titik anoda D_2 (V_b) dan katoda D_1 (V_c) adalah sebesar:

$$V_b = V_a - I_{R_2} R_2 \quad (2.88)$$

$$V_c = V_a - I_{R_3} R_3 \quad (2.89)$$

Substitusi persamaan 2.86 dan 2.87 ke persamaan 2.88 dan 2.89, maka:

$$V_c = 0 \quad (2.90)$$

$$V_b = -\frac{V_{in} R_2}{R_1} \quad (2.91)$$

Potensial pada masukan *inverting* U_2 adalah ekivalen dengan potensial pada masukan *noninverting*, sehingga arus yang melewati R_4 adalah:

$$I_{R_4} = \frac{V_c - V_b}{R_4} \quad (2.92)$$

Arus yang melewati R_5 :

$$I_{R_5} = I_{R_4} \quad (2.93)$$

Tegangan keluaran U_2 adalah:

$$V_o = -V_{R_5} \quad (2.94)$$

$$V_o = -I_{R_5} R_5 \quad (2.95)$$

Substitusi persamaan 2.92 ke persamaan 2.95, maka:

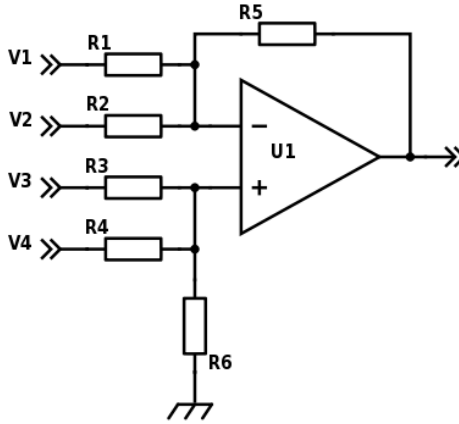
$$V_o = -\frac{(V_c - V_b) R_5}{R_4} \quad (2.96)$$

$$V_o = -\frac{\frac{V_{in} R_2}{R_1} R_5}{R_4} \quad (2.97)$$

$$V_o = -\frac{V_{in} R_3 R_5}{R_1 R_4} \quad (2.98)$$

Jika $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ maka persamaan tegangan keluaran rangkaian adalah

$$V_o = \begin{cases} -V_{in}, & V_{in} < 0 \\ V_{in}, & V_{in} \geq 0 \end{cases} \quad (2.99)$$



Gambar 2.24 Penjumlah analog

2.3.7 Penjumlah Analog

Penjumlah analog merupakan rangkaian yang dapat melakukan operasi penjumlahan tegangan pada sinyal analog. Rangkaian penjumlah menggunakan prinsip konversi tegangan-arus-tegangan dengan menggunakan penguat umpanbalik negatif untuk melakukan proses penjumlahan [18].

Dengan mengasumsikan penguat operasional ideal, arus yang mengalir pada masukan inverting dan noninverting adalah nol dan potensial pada kedua masukan sama, sehingga:

$$I_{R_5} = I_{R_1} + I_{R_2} \quad (2.100)$$

$$I_{R_5} = \frac{V_1 - V_n}{R_1} + \frac{V_2 - V_n}{R_2} \quad (2.101)$$

$$I_{R_6} = I_{R_3} + I_{R_4} \quad (2.102)$$

$$I_{R_6} = \frac{V_3 - V_p}{R_3} + \frac{V_4 - V_p}{R_4} \quad (2.103)$$

Tegangan pada masukan *noninverting* penguat operasional adalah:

$$V_p = I_{R_6} R_6 \quad (2.104)$$

$$V_p = R_6 \left(\frac{V_3 - V_p}{R_3} + \frac{V_4 - V_p}{R_4} \right) \quad (2.105)$$

$$V_p = \frac{V_3 R_4 R_6 + V_4 R_3 R_6}{R_3 R_4 + R_3 R_6 + R_4 R_6} \quad (2.106)$$

Pada penguat operasional ideal dengan umpanbalik negatif, potensial pada kedua masukan penguat adalah sama, sehingga

$$V_n = V_p \quad (2.107)$$

$$I_{R_5} = \frac{V_1 - \frac{V_3 R_4 R_6 + V_4 R_3 R_6}{R_3 R_4 + R_3 R_6 + R_4 R_6}}{R_1} + \frac{V_2 - \frac{V_3 R_4 R_6 + V_4 R_3 R_6}{R_3 R_4 + R_3 R_6 + R_4 R_6}}{R_2} \quad (2.108)$$

$$V_o = V_n - I_{R_5} R_5 \quad (2.109)$$

$$V_o = \frac{V_3 R_4 R_6 + V_4 R_3 R_6}{R_3 R_4 + R_3 R_6 + R_4 R_6} - R_5 \frac{V_1 - \frac{V_3 R_4 R_6 + V_4 R_3 R_6}{R_3 R_4 + R_3 R_6 + R_4 R_6}}{R_1} - R_5 \frac{V_2 - \frac{V_3 R_4 R_6 + V_4 R_3 R_6}{R_3 R_4 + R_3 R_6 + R_4 R_6}}{R_2} \quad (2.110)$$

Apabila $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, maka:

$$\begin{aligned}
V_o &= \frac{V_3 R^2 + V_4 R^2}{3R^2} \\
&\quad - R \frac{\frac{3V_1 R^2 - V_3 R^2 - V_4 R^2}{3R^2}}{R} \\
&\quad - R \frac{\frac{3V_2 R^2 - V_3 R^2 - V_4 R^2}{3R^2}}{R}
\end{aligned} \tag{2.111}$$

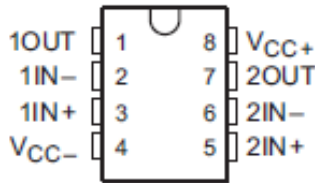
$$\begin{aligned}
V_o &= \frac{V_3 R^2 + V_4 R^2}{3R^2} \\
&\quad - \frac{3V_1 R^2 - V_3 R^2 - V_4 R^2}{3R^2} \\
&\quad - \frac{3V_2 R^2 - V_3 R^2 - V_4 R^2}{3R^2}
\end{aligned} \tag{2.112}$$

$$V_o = \frac{V_3 + V_4}{3} - \frac{3V_1 - V_3 - V_4}{3} - \frac{3V_2 - V_3 - V_4}{3} \tag{2.113}$$

$$V_o = -V_1 - V_2 + V_3 + V_4 \tag{2.114}$$

2.3.8 Penguat Operasional LF353

Penguat operasional LF353 merupakan penguat operasional dengan masukan JFET yang memiliki tegangan offset masukan sangat rendah. Masukan JFET impedansi tinggi digabungkan dengan tingkat keluaran bipolar dengan impedansi keluaran rangkaian terbuka sebesar 200 Ohm. Penguat operasional memiliki karakteristik *gain-bandwidth product* sebesar 3 MHz dan *slew rate* sebesar 13 V/ μ s [22].



Gambar 2.25 Konfigurasi pin LF353

Dalam satu kemasan DIP 8 pin terdapat dua buah penguat operasional.

2.4. Mikrokontroler Atmel ATmega8A

ATmega8A merupakan mikrokontroler buatan *Atmel Corporation* yang menggunakan mikroarsitektur AVR 8-bit. ATmega8A memiliki flash memory sebagai media penyimpanan program sebesar 8 KiB dan RAM sebesar 256 Byte [23]. Mikrokontroler ATmega8A memiliki beberapa peripheral antara lain:

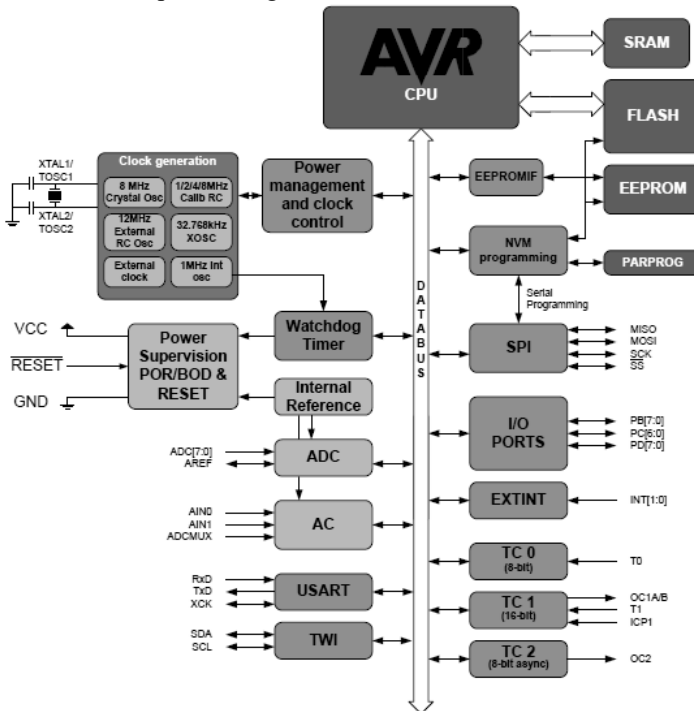
Pengendalian daya dan clock

Konverter analog ke digital

Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter

I/O port control

Interrupt handling



Gambar 2.26 Struktur dan peripheral ATmega8A

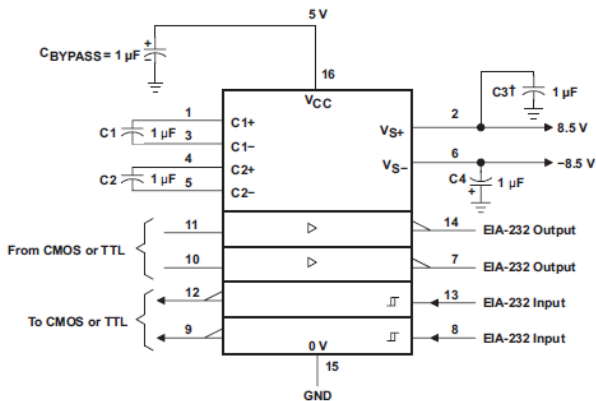
2.5. Komunikasi Serial

Terdapat dua cara komunikasi serial yaitu komunikasi data secara *asinkron* dan komunikasi data secara *sinkron*. Pada komunikasi data serial *sinkron*, *clock* dikirim bersama-sama dengan data serial, sedangkan pada komunikasi data serial *asinkron*, *clock* tidak dikirimkan bersama-sama data serial, tetapi dibangkitkan secara sendiri – sendiri baik pada sisi pengirim (*transmitter*) maupun pada sisi penerima (*receiver*). Pada IBM PC kompatibel port serialnya termasuk jenis *asinkron*. Komunikasi data serial ini dikerjakan oleh UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*). IC UART dibuat khusus untuk mengubah data paralel menjadi data serial dan menerima data serial yang kemudian diubah kembali menjadi data paralel.

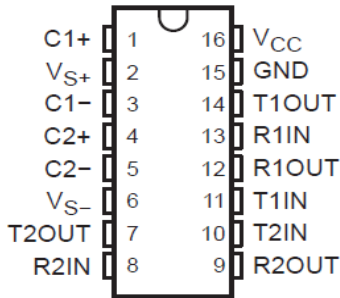
2.5.1 Protokol RS232

Untuk mentransmisikan data dalam jarak yang lebih jauh dapat digunakan standar komunikasi EIA/TIA-232-E atau lebih dikenal dengan RS232. RS232 menggunakan level logika bipolar dimana logika 1 dinyatakan dengan level tegangan 3 V hingga 15 V dan logika 0 dinyatakan dengan level tegangan -3 V hingga -15 V.

Pada protokol RS232, salah satu perangkat yang terhubung berfungsi sebagai *Data Terminal Equipment* (DTE) sedangkan perangkat lainnya berfungsi sebagai *Data Circuit-terminating Equipment* (DCE).



Gambar 2.27 Struktur blok MAX232



Gambar 2.28 Konfigurasi pin MAX 232

2.5.1.1 MAX232

MAX 232 merupakan translator level tegangan dari level TTL ke level tegangan RS232. IC MAX232 memiliki dua rangkaian charge-pump internal yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan +10 V dan -10 V dari tegangan suplai +5 V [24].

2.5.2 Adaptor USB ke Serial

Adaptor USB ke serial merupakan modul yang berfungsi untuk mengubah protokol komunikasi serial RS232 menjadi protokol komunikasi USB dan sebaliknya. Adaptor USB ke serial digunakan pada komputer modern yang tidak lagi memiliki port serial terdedikasi sehingga memerlukan konversi protokol ke protokol USB yang merupakan salah satu protokol komunikasi standar. Adaptor USB ke serial tampil pada sistem operasi sebagai *virtual serial port* yang dapat mengemulasikan fungsi port serial standar.



Gambar 2.29 Adaptor USB ke Serial

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III PERANCANGAN SISTEM

Bab ini menjelaskan perancangan dan implementasi sistem tomografi kapasitansi listrik. Bab ini menjelaskan tentang diagram blok sistem secara umum dan perancangan dari tiap blok secara detail.

3.1. Diagram Blok Sistem

Sistem tomografi kapasitansi listrik secara umum terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras terdiri dari blok sensor kapasitif, multiplekser analog, generator sinyal, pengkondisi sinyal, mikrokontroller, pencatu daya dan pengolah data menggunakan komputer personal.

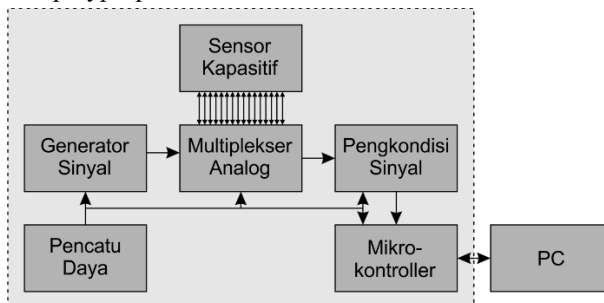
Perangkat lunak terdiri dari firmware pada mikrokontroller yang digunakan sebagai pengendali sensor dan akuisisi data, serta perangkat lunak rekonstruksi citra pada komputer. Konfigurasi komponen ditunjukkan pada Gambar 3.1.

3.2. Perancangan Perangkat Keras

3.2.1 Sensor Kapasitif

Sensor kapasitif untuk sistem tomografi menggunakan 16 buah pelat tembaga dengan ketebalan 0.25 mm berukuran 2cm x 12cm yang disusun melingkar pada pipa PVC berdiameter 4,5 inci (11,43 cm). Tiap pelat sensor dihubungkan ke rangkaian multiplekser analog dengan menggunakan kabel koaksial.

Sisi luar sensor dilapisi dengan perisai berupa pelat tembaga yang dihubungkan ke potensial ground sistem. Lapisan perisai dipisahkan dari pelat-pelat sensor dengan menggunakan perekat polypropilen setebal 1 mm.



Gambar 3.1 Diagram blok perangkat keras ECT



Gambar 3.2 Implementasi sensor kapasitif

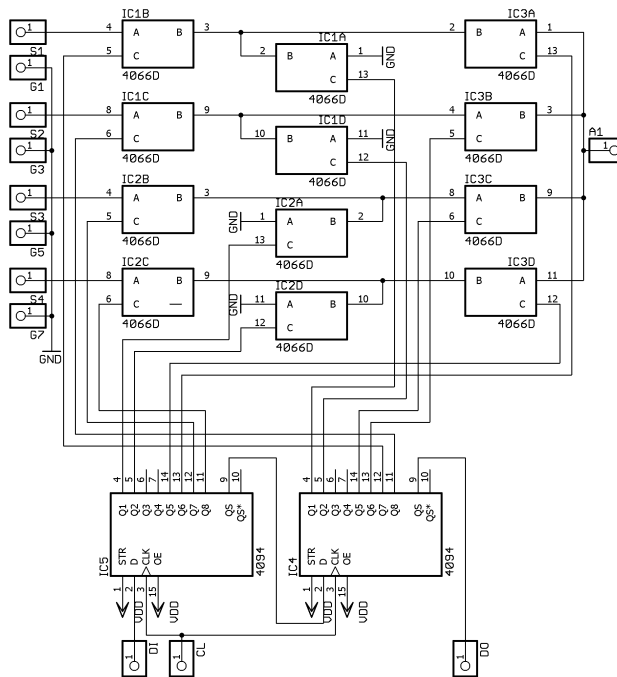
3.2.2 Multiplexer Analog

Rangkaian scanning elektroda dirangkai dari komponen multiplexer analog. Untuk mendapatkan respons system yang cepat dan handal, digunakan switch CMOS HEF4066B. Switch dioperasikan pada catu daya 15 volt (V_{SS} -7,5 volt dan V_{DD} +7,5 volt) untuk memaksimalkan amplitudo sinyal eksitasi yang akan melewati switch. Dengan catu daya 15 volt, switch dapat melewatkan sinyal dengan amplitudo 14 volt puncak-ke-puncak.

Setiap elektroda dilengkapi dengan 6 buah switch CMOS dengan pembagian 3 switch untuk masing-masing fungsi elektroda. Switch disusun dalam topologi T untuk mengurangi kebocoran muatan saat switch dalam keadaan non aktif.

Implementasi multiplexer analog menggunakan 16 kanal sensor yang dikelompokkan menjadi 4 blok identik. Tiap blok terdiri dari dua papan switch identik yang memuat empat kanal. Rangkaian switch T yang terhubung dengan sumber eksitasi dikelompokkan pada papan rangkaian yang terpisah dengan switch yang terhubung pada pengkondisi sinyal untuk mengurangi efek kapasitansi parasitik.

Komparator LM393D digunakan untuk mengubah sinyal logika TTL 5 volt dari mikrokontroler menjadi logika CMOS dengan ayunan tegangan -7,5 volt untuk logika 0 dan +7,5 volt untuk logika 1.

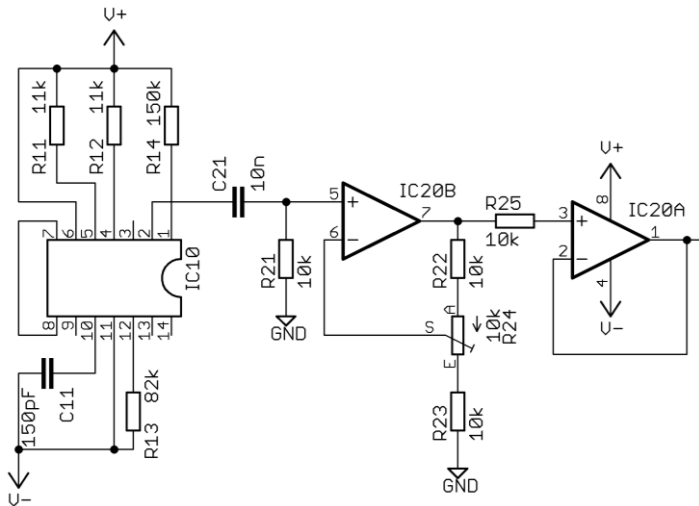


Gambar 3.3 Skema rangkaian papan switch analog

Multiplexer analog diimplementasikan menggunakan komponen SMD dengan desain modular. Tiap keping papan memuat empat buah *half-switch* yang dihubungkan ke *backboard* dengan menggunakan konektor header.



Gambar 3.4 Implementasi rangkaian papan switch analog



Gambar 3.5 Skema rangkaian generator sinyal

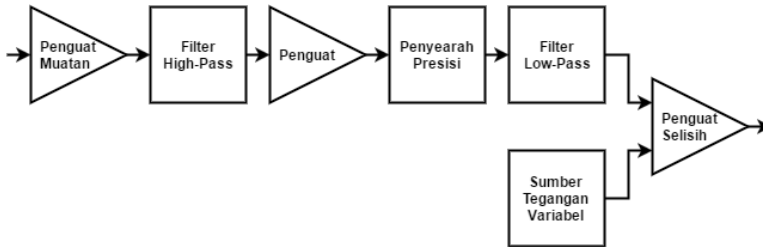
3.2.3 Generator Sinyal

Generator sinyal berfungsi untuk membangkitkan sinyal eksitasi elektroda pada sensor kapasitif. Generator sinyal diimplementasikan dengan menggunakan IC ICL8030 untuk membangkitkan gelombang sinusoidal dengan frekuensi 200 KHz.

Berdasarkan persamaan 2.16, digunakan resistor sebesar 11 KOhm dan kapasitor sebesar 150 pF untuk mendapatkan frekuensi osilasi sebesar 200 KHz. Resistor R1 dan R2 bernilai sama untuk mendapatkan gelombang sinus yang simetris pada sisi naik dan sisi turun. R3 dan R9 digunakan untuk mengubah bentuk gelombang sehingga simetris pada sisi positif dan sisi negatif.



Gambar 3.6 Implementasi generator sinyal



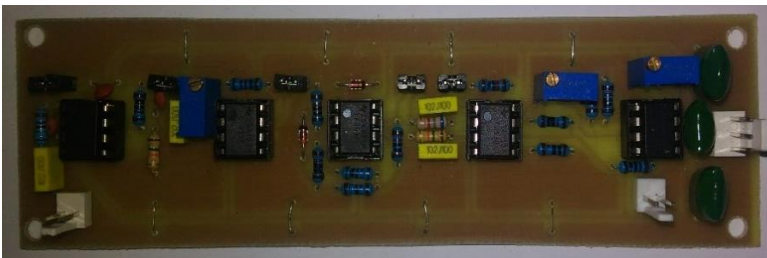
Gambar 3.7 Diagram blok rangkaian pengkondisi sinyal

Keluaran dari ICL8038 merupakan gelombang sinusoidal dengan amplitude sebesar 0.22 tegangan catu daya. Untuk mendapatkan sinyal sebesar 14 volt puncak-ke-puncak, sinyal keluaran ICL8038 dikuatkan oleh penguat noninverting. Penguatan dari penguat noninverting dapat diatur engan menggunakan potensiometer R6 sehingga didapatkan keluaran sinyal sinusoidal dengan amplitude 14 volt puncak-ke-puncak.

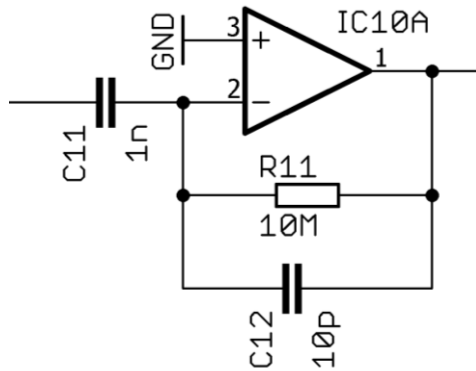
Keluaran penguat noninverting di-*buffer* untuk mengeksitasi elemen sensor kapasitif melalui multiplexer analog.

3.2.4 Pengkondisi Sinyal

Pengkondisi sinyal terdiri dari blok angkaian penguat muatan yang berfungsi untuk menkonversi sinyal muatan dari sensor menjadi sinyal tegangan, filter *low-pass* untuk memblok sinyal DC dan interferensi frekuensi jala-jala listrik, penguat noninverting untuk menguatkan sinyal, penyearah presisi dan filter low-pass untuk mengkonversi sinyal arus bolak-balik sinusoidal menjadi sinyal arus searah, dan penguat selisih untuk mengatur nilai offset sinyal keluaran. Konfigurasi dan alur sinyal ditunjukkan pada diagram blok Gambar 3.7.



Gambar 3.8 Implementasi rangkaian pengkondisi sinyal



Gambar 3.9 Skema rangkaian penguat muatan

3.2.4.1 Penguat Muatan

Penguat muatan digunakan untuk mengkonversi sinyal muatan dari sensor kapasitif menjadi sinyal tegangan.

Karakteristik sensor kapasitif dan multiplexer analog memiliki rentang kapasitansi total sensor dan parasitik sebesar 2 pF hingga 10 pF sehingga untuk mendapatkan penguatan sebesar 1 (0 dB) pada kapasitansi maksimum, digunakan kapasitor 10 pF sebagai komponen umpanbalik negatif. Resistor umpanbalik R_1 sebesar 10 MΩ digunakan untuk mencegah rangkaian beroperasi pada mode loop terbuka.

Berdasarkan persamaan 2.27, resistor dan kapasitor pada rangkaian umpanbalik membentuk integrator dengan konstanta waktu

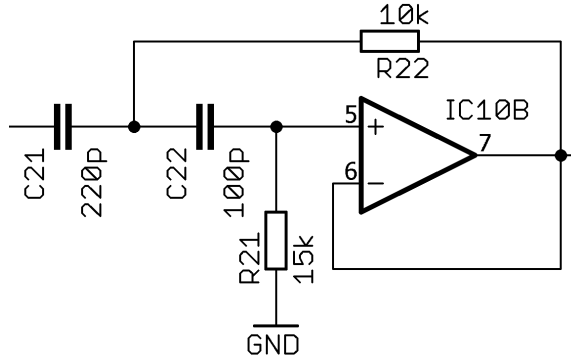
$$\tau = 10 \text{ M}\Omega \cdot 10 \text{ pF} \quad (3.1)$$

$$\tau = 100 \mu\text{s} \quad (3.2)$$

3.2.4.2 Filter High Pass

Filter *high pass* digunakan untuk memblokir komponen DC pada sinyal sensor yang disebabkan oleh arus bocor pada multiplexer serta komponen frekuensi rendah yang disebabkan oleh jala-jala listrik.

Topologi filter yang digunakan merupakan filter Sallen-Key dengan frekuensi cutoff 100 KHz dan respons Bessel ($Q = 0,58$).



Gambar 3.10 Skema rangkaian filter *high pass*

Untuk mempermudah perhitungan, ditetapkan rasio $C_{21} \approx 2,2 C_{22}$ dengan nilai $C_{21} = 220 \text{ pF}$ dan $C_{22} = 100 \text{ pF}$. Rasio R_{21} dan R_{22} ditentukan berdasarkan target faktor Q menggunakan persamaan 2.67 dan 2.68:

$$0,58 = \frac{\sqrt{2,2 \frac{R_2}{R_3}}}{2,2 + 1} \quad (3.3)$$

$$\frac{R_2}{R_3} = \left(\frac{0,58 \times 3,2}{\sqrt{2,2}} \right)^2 \quad (3.4)$$

$$\frac{R_2}{R_3} = 1,57 \quad (3.5)$$

Nilai R_{22} ditentukan berdasarkan target frekuensi cutoff filter

$$100 \text{ kHz} = \frac{1}{2\pi R \times 100 \text{ pF} \times \sqrt{1,57 \times 2,2}} \quad (3.6)$$

$$R = \frac{1}{2\pi R \times 100 \text{ kHz} \times 100 \text{ pF} \times \sqrt{3,454}} \quad (3.7)$$

$$R = 8567\Omega \quad (3.8)$$

Nilai resistor standar yang mendekati $R_{22} = 10709 \text{ Ohm}$ dan $R_{21} = 13450 \text{ Ohm}$ adalah 10 kOhm dan 15 kOhm .

3.2.4.3 Penguat Noninverting

Penguat *noninverting* digunakan untuk menguatkan sinyal tegangan hasil konversi penguat muatan lebih lanjut. Penguatan dilakukan dalam dua tingkat untuk memperkecil kebutuhan *gain-bandwidth product* (GBW) pada penguat operasional. Implementasi penguat menggunakan skematik pada gambar 3.11.

Penguat tingkat pertama merupakan penguat variabel dengan penguatan minimum terjadi ketika R_{31} pada posisi minimum sehingga masukan *inverting* penguat operasional terhubung langsung ke keluaran. Nilai penguatan minimum sebesar

$$A_{min} = \frac{R_{31} + R_{32}}{R_{31} + R_{32}} \quad (3.9)$$

$$A_{min} = 1 \quad (3.10)$$

Penguatan maksimum terjadi ketika R_{31} pada posisi maksimum sehingga seluruh resistansi R_{31} membentangi antara masukan *inverting* dan keluaran penguat operasional. Nilai penguatan maksimum berdasarkan persamaan 2.31 sebesar

$$A_{max} = \frac{R_{31} + R_{32}}{R_{32}} \quad (3.11)$$

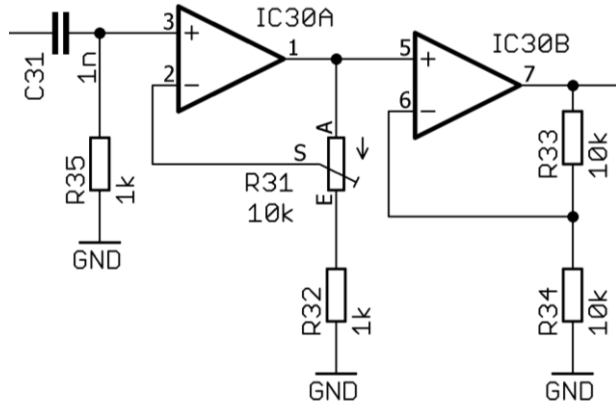
$$A_{max} = \frac{10 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \quad (3.12)$$

$$A_{max} = 11 \quad (3.13)$$

Kebutuhan *gain-bandwidth product* (GBW) tertinggi terjadi ketika penguat beroperasi pada penguatan maksimum. Nilai *gain-bandwidth product* dapat diketahui dengan menggunakan persamaan

$$GBW = 11 \cdot 200 \text{ kHz} \quad (3.14)$$

$$GBW = 2,2 \text{ MHz} \quad (3.15)$$



Gambar 3.11 Skema rangkaian penguat *noninverting*

Kebutuhan nilai *gain-bandwidth product* sebesar 2,2 MHz dapat dipenuhi oleh penguat operasional LF353 yang memiliki nilai *gain-bandwidth product* sebesar 3 MHz.

Penguat tingkat kedua merupakan penguat *noninverting* dengan penguatan ditentukan oleh R_{33} dan R_{34} sebesar

$$A_2 = \frac{R_{33} + R_{34}}{R_{34}} \quad (3.16)$$

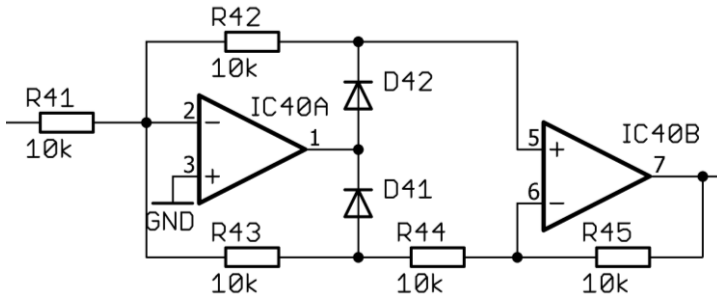
$$A_2 = \frac{10 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} \quad (3.17)$$

$$A_2 = 2 \quad (3.18)$$

Kapasitor C_{31} digunakan untuk memblokir komponen DC sinyal dari blok rangkaian sebelumnya. R_{35} digunakan sebagai jalur balik sehingga arus bias pada masukan noninverting penguat operasional IC_{30A} dapat mengalir ke ground dan tidak mengisi kapasitor C_{31} .

3.2.4.4 Penyearah Presisi

Penyearah presisi digunakan untuk menyearahkan sinyal arus bolak-balik dari sensor menjadi sinyal arus searah sehingga dapat dirata-rata dan dikonversi oleh ADC mikrokontroller yang memerlukan sinyal monopolar positif.



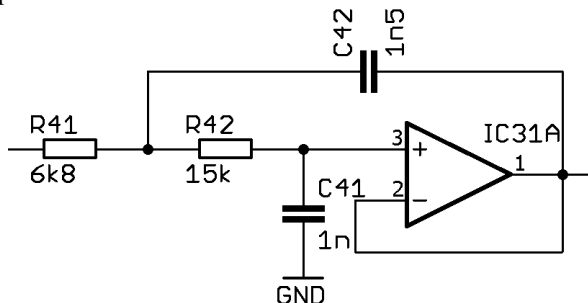
Gambar 3.12 Skema rangkaian penyearah presisi

Rangkaian diimplementasikan dengan skematik pada Gambar 3.12. Untuk mendapatkan sinyal keluaran yang presisi maka R_1 , R_2 , R_3 , R_4 dan R_5 diset bernilai sama sebesar 10 kOhm. Dioda penyearah yang digunakan adalah dioda small signal 1N4148. Penguat operasional yang digunakan adalah LF353. Rangkaian dicatu tegangan 24 Volt (V_{EE} -12 V, V_{CC} +12 V).

3.2.4.5 Filter Low Pass

Filter *lowpass* digunakan untuk merata-rata gelombang sinyal sensor yang telah disearahkan sehingga dapat diakuisisi oleh ADC. Filter menggunakan topologi Sallen-Key dengan frekuensi cutoff sebesar 10 KHz dengan respons Bessel.

Untuk mempermudah perhitungan, ditetapkan rasio $C_{42} \approx 1,5 C_{41}$ dengan nilai $C_{42} = 1,5$ nF dan $C_{41} = 1$ nF. Rasio R_{41} dan R_{42} ditentukan berdasarkan target Q menggunakan persamaan 2.62 dan 2.63:



Gambar 3.13 Skema rangkaian filter *low pass*

$$0,58 = \frac{\sqrt{1,5 \frac{R_{41}}{R_{42}}}}{1,5 + 1} \quad (3.19)$$

$$\frac{R_{41}}{R_{42}} = \left(\frac{0,58 \times 2,5}{\sqrt{1,5}} \right)^2 \quad (3.20)$$

$$\frac{R_{41}}{R_{42}} = 1,40 \quad (3.21)$$

Nilai R_3 ditentukan berdasarkan target frekuensi cutoff

$$10 \text{ kHz} = \frac{1}{2\pi R \times 1 \text{ nF} \times \sqrt{1,40 \times 1,5}} \quad (3.22)$$

$$R = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \text{ kHz} \cdot 1 \text{ nF} \sqrt{2,1}} \quad (3.23)$$

$$R = 109831\Omega \quad (3.24)$$

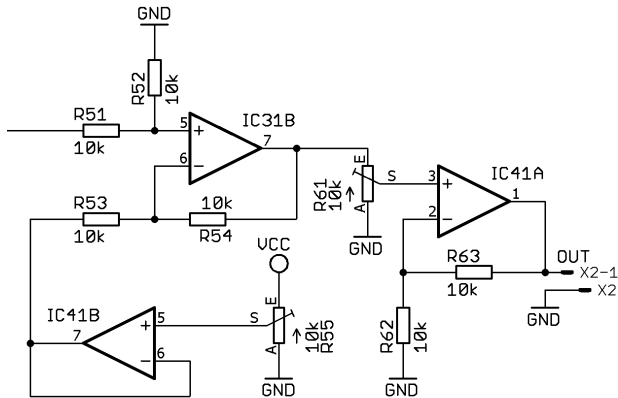
Nilai resistor standar yang mendekati $R_3 = 10983 \text{ Ohm}$ dan $R_2 = 123006 \text{ Ohm}$ adalah $8,2 \text{ kOhm}$ dan 12 kOhm .

3.2.4.6 Pengurang Offset dan Penguat Noninverting

Pengurang offset digunakan untuk mengeliminasi offset sinyal yang disebabkan oleh kapasitansi parasitic pada sensor dan multiplekser analog, sedangkan penguat digunakan untuk menguatkan sinyal sehingga sinyal keluaran memiliki tegangan maksimum sebesar tegangan maksimum ADC. Hal tersebut bertujuan untuk memaksimalkan resolusi ADC.

Rangkaian didesain sesuai dengan skematik Gambar 3.14. Rangkaian substraktor menggunakan R_{51} , R_{52} , R_{53} dan R_{54} yang sama sebesar 10 kOhm . Nilai bias yang menjadi pengurang diatur melalui potensiometer R_{55} yang dibuffer oleh penguat operasional IC_{41B}.

Rangkaian penguat terakhir diset pada penguatan sebesar dua kali dengan pengaturan attenuasi sinyal masukan menggunakan R_{61} . Rangkaian penguat digunakan untuk mengatur tingkat sinyal keluaran rangkaian pengkondisi sinyal sehingga nilai maksimum sinyal mendekati nilai maksimum masukan ADC sehingga didapatkan resolusi maksimum.

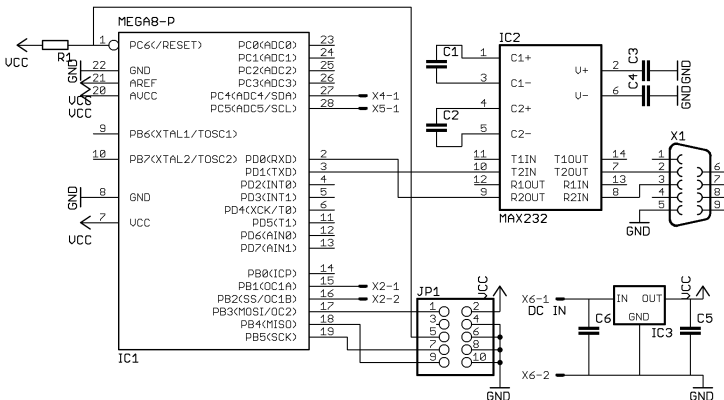


Gambar 3.14 Skema rangkaian pengurang offset dan penguat

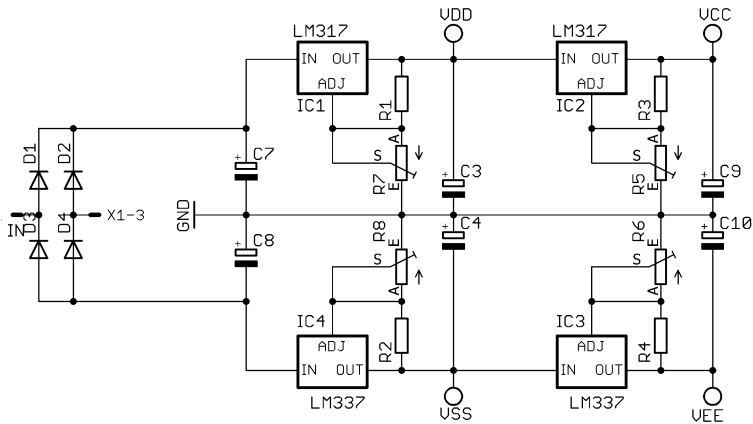
3.2.5 Mikrokontroler

Mikrokontroler digunakan untuk mengatur konfigurasi multiplexer analog, mengakuisisi sinyal dan mengkonversi sinyal ke digital, serta mengirimkan sinyal ke komputer melalui protokol RS232. Desain rangkaian ditunjukkan pada Gambar 3.15.

Port yang digunakan sebagai konverter digital ke analog adalah port PC5 yang dikonfigurasi sebagai port peripheral ADC4. Tegangan referensi ADC menggunakan tegangan catu daya 5 volt sehingga didapatkan rentang tegangan konversi sebesar 5 volt.



Gambar 3.15 Skema rangkaian mikrokontroler



Gambar 3.16 Skema rangkaian pencatu daya

Pengaturan konfigurasi switch diatur menggunakan data serial melalui pin PB1 sebagai data dan pin PB2 sebagai clock.

Komunikasi RS232 menggunakan peripheral USART pada mikrokontroler yang ditranslasikan menjadi level tegangan RS232 oleh IC MAX232. IC MAX232 membutuhkan kapasitor eksternal sebagai penyimpan muatan rangkaian charge pump internal IC yang menghasilkan tegangan +10 Volt dari tegangan suplai, dan membalik polaritas untuk menghasilkan tegangan -10 Volt.

Untuk kapasitor eksternal digunakan kapasitor tantalum dengan nilai kapasitansi 1 μ F, tegangan kerja 16 volt. IC MAX232 membutuhkan tegangan suplai +5Volt. Transmitter data serial dengan level tegangan TTL dihubungkan ke pin T1IN dan receiver dihubungkan ke pin R1OUT. Keluaran data serial RS232 dihubungkan ke konektor DB9 melalui pin T1OUT sedangkan masukan data *serial* RS232 dihubungkan melalui pin R1IN.

3.2.6 Pencatu Daya

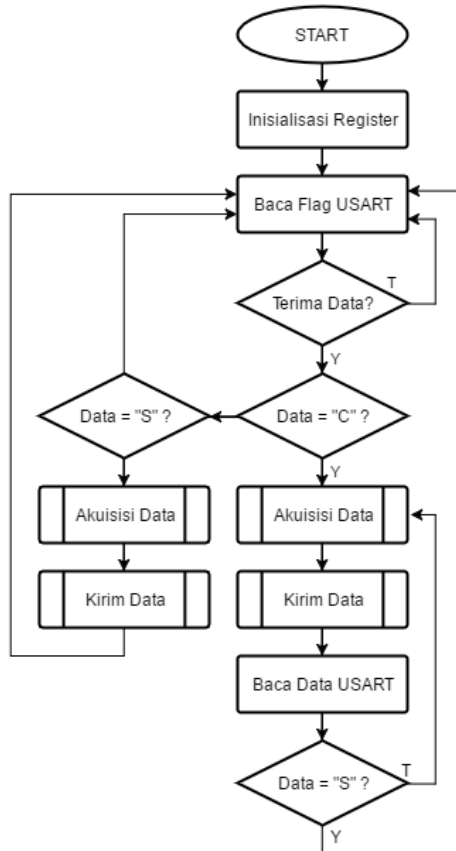
Pencatu daya menggunakan sumber jala-jala listrik 220 volt yang dikonversi step-down melalui trafo menjadi catu simetris -12V 0 +12V. Penyearahan dilakukan dengan menggunakan dioda 1N4007. Regulasi tegangan dilakukan dengan menggunakan IC LM317 pada sisi catu positif dan LM 337 pada sisi catu negatif. Regulator diset pada keluaran +12 V – -12 V untuk catu daya

rangkaian analog dan +7,5 V – -7,5V untuk catu daya rangkaian digital. Desain rangkaian ditunjukkan pada Gambar 3.16.

3.3. Perancangan Perangkat Lunak

3.3.1 Firmware Mikrokontroller

Firmware mikrokontroller digunakan untuk mengubah konfigurasi sensor melalui multiplekser analog, mengakuisisi data pengukuran serta mengirimkan data ke komputer. Alur kerja *firmware* mikrokontroller ditunjukkan pada Gambar 3.17.



Gambar 3.17 Diagram blok *firmware* mikrokontroller

3.3.1.1 Konfigurasi Sensor

Konfigurasi sensor dikendalikan dengan menggunakan mikrokontroller yang mengirimkan data serial ke multiplexer analog. Penentuan pasangan sensor yang berfungsi sebagai sumber eksitasi dan sensor akuisisi dilakukan dengan urutan sesuai pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 menunjukkan konfigurasi titik tengah pelat elektroda yang berfungsi sebagai exciter dan sensor. Tiap pengukuran menggunakan tiga buah elektroda berdekatan yang digabung menjadi satu untuk berfungsi sebagai exciter dan sensor, serta satu elektroda pada tepi exciter dan sensor sebagai perisai. Exciter dihubungkan ke kanal masukan, sensor dihubungkan ke kanal keluaran, perisai dihubungkan ke *ground*, sedangkan elektroda lainnya dalam keadaan floating.

Tabel 3.1 Urutan konfigurasi sensor

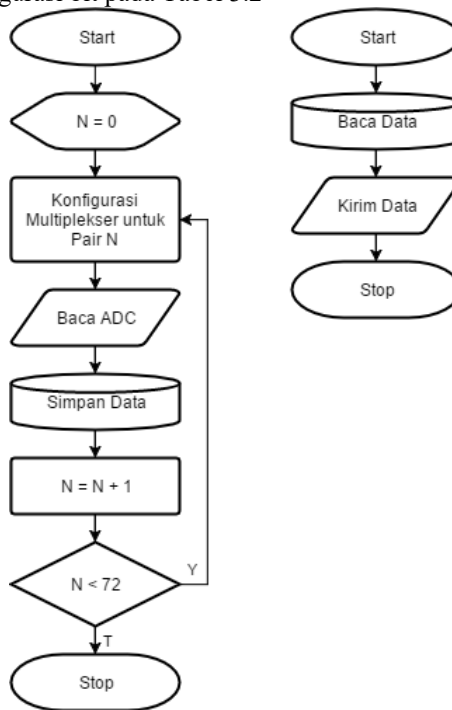
		Sense															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
Eksitasi	0					1	2	3	4	5	6	7	8	9			
	1						10	11	12	13	14	15	16	17	18		
	2							19	20	21	22	23	24	25	26	27	
	3								28	29	30	31	32	33	34	35	36
	4									37	38	39	40	41	42	43	44
	5										45	46	47	48	49	50	51
	6											52	53	54	55	56	57
	7												58	59	60	61	62
	8													63	64	65	66
	9														67	68	69
	A															70	71
	B																72
	C																
	D																
	E																
	F																

Tabel 3.2 Konfigurasi bit shift register

Bit	0x0	0x1	0x2	0x3	0x4	0x5	0x6	0x7	0x8	0x9	0xa	0xb	0xc	0xd	0xe	0xf
SW	1A	0A	1B	2B	X	X	1C	0C	3A	2A	0B	3B	X	X	3C	2C

Untuk setiap pengukuran dengan sensor m dan exciter n , maka elektroda nomor $m-1$, m dan $m+1$ berfungsi sebagai sensor; elektroda nomor $n-1$, n dan $n+1$ berfungsi sebagai eksitasi; elektroda nomor $m-2$, $m+2$, $n-2$ dan $n+2$ berfungsi sebagai perisai; dan elektroda sisanya dalam keadaan floating.

Konfigurasi switch pada multiplexer analog diset menggunakan kode serial yang didekode menjadi kode parallel oleh shift register. Pada perangkat keras multiplexer analog, terdapat 16 switch yang dikelompokkan menjadi 4 blok identik. Tiap blok terdiri dari dua papan switch dengan konfigurasi bit pada Tabel 3.2



Gambar 3.18 Diagram blok akuisisi data dan komunikasi

3.3.1.2 Akuisisi Sinyal Sensor

Akuisisi sinyal sensor dilakukan dengan menggunakan peripheral ADC internal pada mikrokontroler AVR. Konversi dilakukan 5 ms setelah multiplekser analog selesai dikonfigurasi untuk meyakinkan bahwa tegangan keluaran rangkaian pengkondisi sinyal telah stabil pada nilai sinyal yang baru. Tiap sensor dilakukan konversi sebanyak empat kali dan dirata-rata untuk mengurangi efek derau pada pengukuran.

3.3.1.3 Pengiriman dan Penerimaan Data

Pengiriman dan penerimaan data ke komputer diimplementasikan dengan menggunakan peripheral USART pada mikrokontroler AVR. Baud Rate yang digunakan dalam komunikasi adalah sebesar 348000 baud. Nilai baud rate ditentukan dengan pertimbangan nilai tertinggi yang dapat dicapai tanpa terjadi kesalahan pewaktuan *clock* USART yang signifikan pada mikrokontroler.

Penerimaan data perintah dari komputer dilakukan dengan cara memonitor register UCR ketika interrupt USART_RX terpicu oleh adanya data yang diterima oleh mikrokontroler. Ketika data perintah yang diterima sesuai dengan data perintah yang telah diset, mikrokontroler mulai melakukan pengukuran pada sensor dan mengirimkan hasil pengukuran ke komputer.

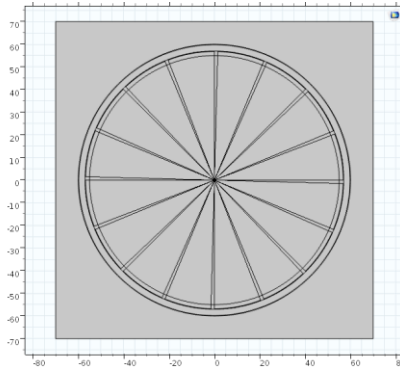
Data dikirimkan ke komputer dalam format *string* dengan pembatas antar data berupa karakter spasi (“ ”) dan penanda *end-of-transmission* berupa karakter *newline* (“\n”).

3.3.2 Peta Sensitivitas

Perhitungan peta sensitivitas dilakukan dengan menggunakan metode pemodelan. Pada metode ini, karakteristik medan listrik pada sensor disimulasikan sesuai dengan desain konstruksi sensor. Persebaran medan listrik digunakan untuk menghitung nilai sensitivitas pada tiap piksel peta sensitivitas berdasarkan persamaan 2.13.

3.3.2.1 Simulasi Sensor

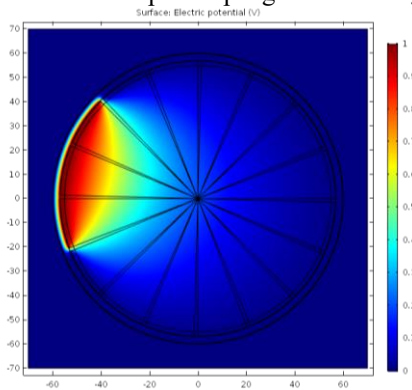
Medan listrik yang dibangkitkan oleh sensor disimulasikan dalam perangkat lunak simulasi *COMSOL Multiphysics*.



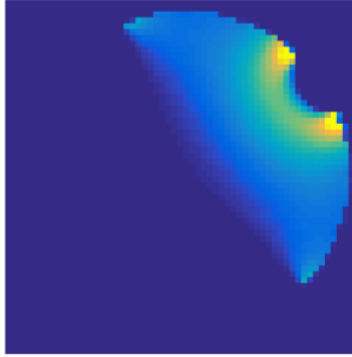
Gambar 3.19 Model sensor pada perangkat lunak simulasi

Simulasi dilakukan dalam mode dua dimensi dengan mengasumsikan panjang sensor tak hingga. Bahan pipa merupakan *polyvinyl chloride* (PVC) dengan diameter 113 mm dan tebal 2 mm. Bahan elektroda sensor merupakan tembaga ASTM B1 dengan tebal 0,2 mm. Bentuk model sensor ditunjukkan pada Gambar 3.19.

Simulasi dilakukan dengan mengkonfigurasi tiga buah pelat yang berdekatan sebagai terminal sumber yang dieksitasi oleh tegangan sebesar satu unit tegangan (1V) dan persebaran medan listrik yang dihasilkan direkam dalam bentuk data teks. Simulasi dilakukan untuk setiap pasangan elektroda sensor yang digunakan dalam proses pengukuran tomografi.



Gambar 3.20 Hasil simulasi medan listrik sensor



Gambar 3.21 Peta sensitivitas untuk pasangan elektroda ke-1

3.3.2.2 Perhitungan Peta Sensitivitas

Perhitungan peta sensitivitas dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *MATLAB* berdasarkan persamaan 2.14. *MATLAB* memuat data medan listrik hasil simulasi berupa berkas teks dan melakukan perhitungan *dot product* untuk setiap pasangan sensor yang digunakan dalam pengukuran.

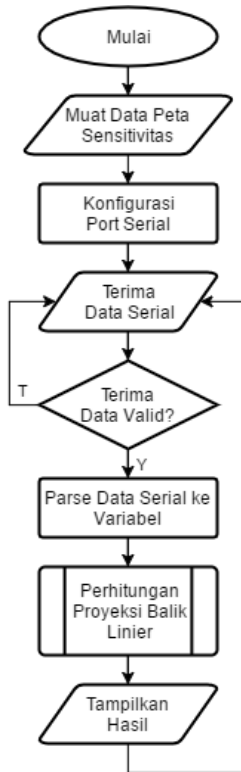
$$S_n(x, y) = - \sum_{n=1}^{72} \frac{\nabla \phi_{n(exciter)}}{1} \frac{\nabla \phi_{n(sense)}}{1} \quad (3.25)$$

Nilai hasil perhitungan dibatasi dengan nilai maksimum 800 dan minimum -800 untuk mengurangi efek pemuncakan tajam yang terjadi pada tepi sensor. Hasil perhitungan kemudian dinormalisasi.

3.3.3 Perangkat Lunak Rekonstruksi Citra

Rekonstruksi citra tomografi diimplementasikan dengan menggunakan Visual Basic yang dikembangkan menggunakan IDE *Microsoft Visual Studio*. Perangkat lunak berfungsi untuk mengolah data hasil pengukuran menjadi data persebaran permittivitas dan menampilkan data permittivitas dalam bentuk citra.

Perangkat lunak terdiri dari empat bagian utama, yaitu bagian pengatur komunikasi serial, bagian pemuat peta sensitivitas, bagian rekonstruksi citra dan bagian penampil data.



Gambar 3.22 Diagram blok perangkat lunak rekonstruksi citra

3.3.3.1 Subprogram Komunikasi Serial

Subprogram bagian pengatur komunikasi serial berfungsi untuk menghubungkan perangkat lunak dengan port serial virtual yang digunakan oleh komunikasi serial perangkat keras akuisisi data. Subprogram mendeteksi kode awal data yang diterima dari mikrokontroler, mem-*parse* data string yang diterima menjadi variabel *array* data *integer* yang dapat diolah secara matematis

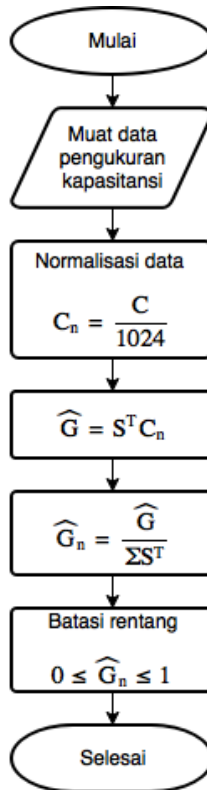
3.3.3.2 Subprogram Pemuat Peta Sensitivitas

Subprogram bagian pemuat peta sensitivitas berfungsi memuat berkas peta sensitivitas yang telah dihitung

sebelumnya. Berkas dalam bentuk satu buah teks ASCII di-parse sehingga data dapat disimpan sebagai 72 buah variabel array integer untuk setiap pasang pengukuran sensor.

3.3.3.3 Subprogram Rekonstruksi Citra

Subprogram bagian rekonstruksi citra berfungsi mengolah data hasil pengukuran sehingga didapatkan informasi potongan melintang benda. Rekonstruksi citra menggunakan metode proyeksi balik linier (*linear back-projection*) menurut Persamaan 2.13. Subprogram rekonstruksi citra melakukan proses pengolahan data setiap terjadi penerimaan data melalui komunikasi serial.



Gambar 3.23 Diagram blok algoritma proyeksi balik linier

Setiap terjadi penerimaan data, subprogram melakukan *parsing* data dari format teks serial menjadi variabel-variabel integer pada array masukan pengukuran dengan dimensi 72x1. Data tiap pengukuran kemudian dinormalisasi dengan membagi nilai variabel dengan 1024 (nilai maksimum data pengukuran).

$$C_n = \frac{C_r}{1024} \quad (3.26)$$

Nilai permittivitas pada tiap-tiap piksel kemudian dihitung dengan menjumlahkan hasil kali nilai peta sensitivitas piksel tersebut dengan nilai hasil pengukuran pada pasangan elektroda yang bersesuaian. Nilai dinormalisasi dengan jumlah nilai sensitivitas pada piksel tersebut pada seluruh pasangan elektroda.

$$G(x, y) = \frac{\sum_{n=1}^{72} S_n(x, y) C_n}{\sum_{n=1}^{72} S_n(x, y)} \quad (3.27)$$

Hasil yang didapatkan merupakan peta nilai permittivitas relatif dengan nilai antara 0 dan 1.

3.3.3.4 Subprogram Penampil Citra

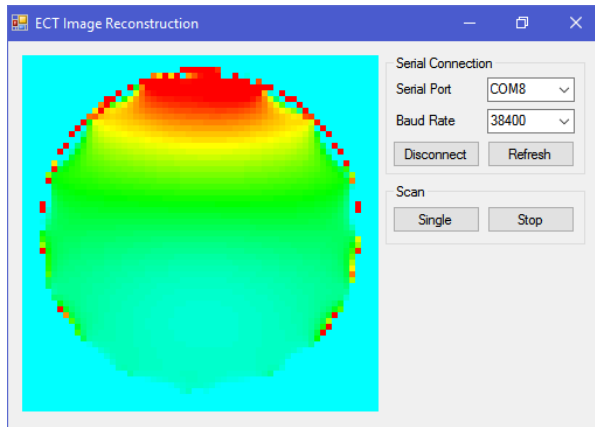
Subprogram bagian penampil data menggunakan *library* EmguCV untuk menampilkan informasi array hasil perhitungan dalam bentuk citra peta kontur dua dimensi. Peta penampang hasil rekonstruksi dengan ukuran 61x61 piksel ditampilkan dalam citra berukuran 305x305 piksel. Tiap satu piksel hasil rekonstruksi direpresentasikan dengan area berukuran 5x5 piksel pada tampilan peta kontur.

Nilai permittivitas pada tiap piksel ditampilkan sebagai gradien warna (*hue*) pada ruang warna HSV. Rentang gradien warna yang digunakan adalah rentang nilai H=90 (cyan) untuk nilai data 0, hingga H=0 (merah) untuk nilai data 1.

$$H(x, y) = (1 - G(x, y)) \times 90 \quad (3.28)$$

Nilai saturasi (S) dan kecerlangan (V) diset pada nilai 255 (maksimum).

Implementasi antarmuka grafis penampil citra ditunjukkan pada Gambar 3.24.



Gambar 3.24 Implementasi perangkat lunak rekonstruksi citra

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Pengujian alat dilakukan dengan cara menguji respons masing-masing blok penyusun sistem serta menguji respons sistem secara keseluruhan.

4.1. Sensor Kapasitif

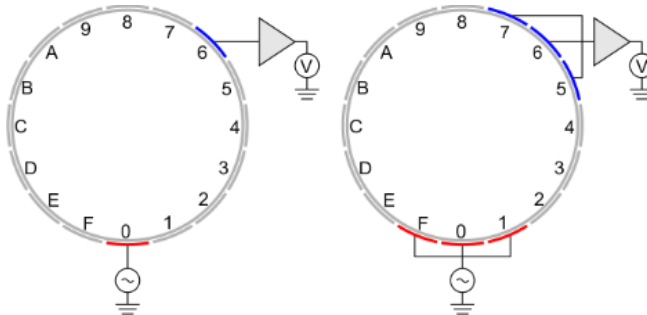
4.1.1 Respons Sensor Tersegmentasi

Pengujian respons sensor tersegmentasi dilakukan dengan cara mengukur nilai kapasitansi pasangan-pasangan elektroda sensor pada frekuensi operasi 200 kHz dengan benda uji udara ($\epsilon_r = 1$) dan air ($\epsilon_r = 80$) pada suhu ruang 27°C. Pengujian dilakukan dengan konfigurasi rangkaian seperti pada Gambar 4.1. Sumber sinyal berupa pembangkit gelombang sinusoidal dengan frekuensi 200 kHz dan amplitudo 1 Volt. Pengukuran kapasitansi dilakukan dengan mengukur nilai tegangan keluaran penguat muatan yang telah dikalibrasi terhadap nilai kapasitansi masukan dengan menggunakan LCR-meter.

Tiap pengujian dilakukan pada konfigurasi sensor elektroda tunggal dan konfigurasi sensor gabungan sebanyak 3 elektroda. Pengujian dilakukan untuk mengukur sensitivitas sensor pada kedua konfigurasi. Hasil pengujian pada sensor tunggal ditampilkan pada Tabel 4.1, sedangkan hasil pengujian pada sensor tersegmentasi ditampilkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.1 Respons sensor tunggal

Elektroda Eksitasi	Elektroda Penerima	Kapasitansi (Kosong)	Kapasitansi (Air)	Selisih	Sensitivitas (pF/ ϵ_r)
0	4	0,835	2,01	1,175	0,0149
0	5	0,588	1,36	0,772	0,0098
0	6	0,461	1,03	0,569	0,0072
0	7	0,412	0,895	0,483	0,0061
0	8	0,374	0,842	0,468	0,0059
0	9	0,366	0,856	0,490	0,0062
0	A	0,448	1,04	0,592	0,0075
0	B	0,534	1,22	0,686	0,0087
0	C	0,814	1,90	1,086	0,0137



Gambar 4.1 Metode pengujian sensor tersegmentasi

Dari hasil pengukuran dapat diketahui bahwa penggunaan sensor tersegmentasi dapat meningkatkan nilai kapasitansi yang terukur pada tiap posisi pengukuran. Sensor elektroda tunggal memiliki sensitivitas terhadap perbedaan permittivitas sebesar $0,0143 \text{ pF}/\epsilon_r$ untuk pasangan elektroda 0-4 dan 0-C (berdekatan) dan $0,0059 \text{ pF}/\epsilon_r$ untuk pasangan elektroda 0-8 (berlawanan). Sensor elektroda tersegmentasi memiliki sensitivitas terhadap perbedaan permittivitas sebesar $0,0384 \text{ pF}/\epsilon_r$ untuk pasangan elektroda 0-4 dan 0-C (berdekatan) dan $0,0178 \text{ pF}/\epsilon_r$ untuk pasangan elektroda 0-8 (berlawanan). Berdasarkan perhitungan rerata peningkatan sensitivitas pada Tabel 4.3, penggunaan elektroda tersegmentasi sebanyak tiga buah dapat meningkatkan sensitivitas sebesar rata-rata 2,76 kali dari penggunaan elektroda tunggal.

Tabel 4.2 Respons sensor tersegmentasi

Elektroda Eksitasi	Elektroda Penerima	Kapasitansi (Udara)	Kapasitansi (Air)	Selisih	Sensitivitas (pF/ϵ_r)
F, 0, 1	3, 4, 5	2,20	5,286	3,086	0,0391
F, 0, 1	4, 5, 6	1,50	3,612	2,112	0,0267
F, 0, 1	5, 6, 7	1,13	2,745	1,615	0,0204
F, 0, 1	6, 7, 8	0,990	2,394	1,404	0,0178
F, 0, 1	7, 8, 9	0,925	2,237	1,312	0,0166
F, 0, 1	8, 9, A	0,941	2,274	1,333	0,0169
F, 0, 1	9, A, B	1,14	2,754	1,614	0,0204
F, 0, 1	A, B, C	1,34	3,225	1,885	0,0239
F, 0, 1	B, C, D	2,09	5,067	2,977	0,0377

Tabel 4.3 Perbandingan respons sensor

Sensitivitas (pF/ϵ_r)		Perbandingan ($S_{\text{seg}}/S_{\text{tgl}}$)
Tunggal	Tesegmentasi	
0,0149	0,0391	2,626
0,0098	0,0267	2,736
0,0072	0,0204	2,838
0,0061	0,0178	2,907
0,0059	0,0166	2,803
0,0062	0,0169	2,720
0,0075	0,0204	2,726
0,0087	0,0239	2,748
0,0137	0,0377	2,741
Rerata		2,760

4.1.2 Respons Sensor Berperisai

Pengujian dilakukan untuk mengukur sensitivitas sensor berperisai terhadap gangguan luar dan membandingkan respons yang didapat dengan respons sensor yang tidak berperisai. Pengujian dilakukan dengan mengukur amplitudo sinyal yang dideteksi elektroda sensor ketika sensor diberi gangguan berupa air dalam botol pada bagian luar sensor seperti pada Gambar 4.2.

Dari data hasil pengukuran pada Tabel 4.4 dan citra hasil rekonstruksi pada Tabel 4.5, dapat diketahui bahwa penggunaan perisai dapat meniadakan efek gangguan benda luar pada bidang radial sensor. Penggunaan perisai pada sensor menyebabkan pelemahan sinyal yang diterima oleh sistem akuisisi data.



Gambar 4.2 Pengujian sensor berperisai

Tabel 4.4 Respons sensor terhadap gangguan luar

Elektroda Eksitasi	Elektroda Penerima	Tanpa Perisai		Dengan Perisai	
		Kosong	Ganggu	Kosong	Ganggu
F, 0, 1	3, 4, 5	1,401	1,391	0,854	0,853
F, 0, 1	4, 5, 6	0,889	0,884	0,582	0,582
F, 0, 1	5, 6, 7	0,669	0,671	0,438	0,440
F, 0, 1	6, 7, 8	0,576	0,594	0,383	0,384
F, 0, 1	7, 8, 9	0,547	0,570	0,358	0,357
F, 0, 1	8, 9, A	0,566	0,585	0,363	0,366
F, 0, 1	9, A, B	0,684	0,690	0,441	0,444
F, 0, 1	A, B, C	0,859	0,856	0,518	0,517
F, 0, 1	B, C, D	1,387	1,373	0,806	0,806

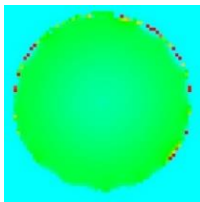
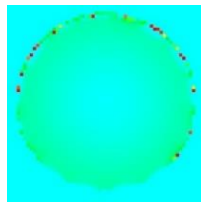
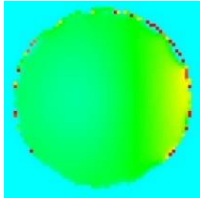
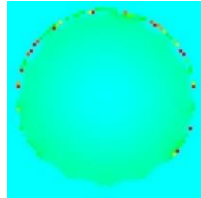
4.2. Pengkondisi Sinyal

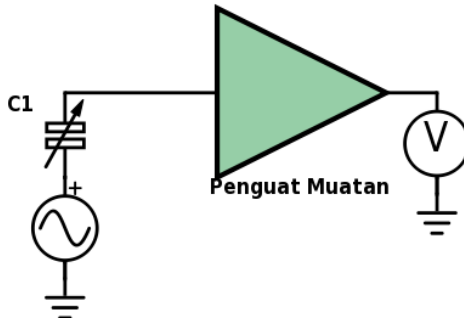
Pengujian rangkaian pengkondisi sinyal dilakukan dengan menguji respons tiap-tiap blok rangkaian dan respons rangkaian secara keseluruhan.

4.2.1 Penguat Muatan

Pengujian penguat muatan dilakukan untuk mengetahui karakterisasi respons keluaran tegangan terhadap nilai kapasitansi pada masukan.

Tabel 4.5 Efek gangguan luar pada citra rekonstruksi

Gangguan Eksternal	Tanpa Perisai	Dengan Perisai
Tanpa Gangguan		
Dengan Gangguan		



Gambar 4.3 Rangkaian pengujian penguat muatan

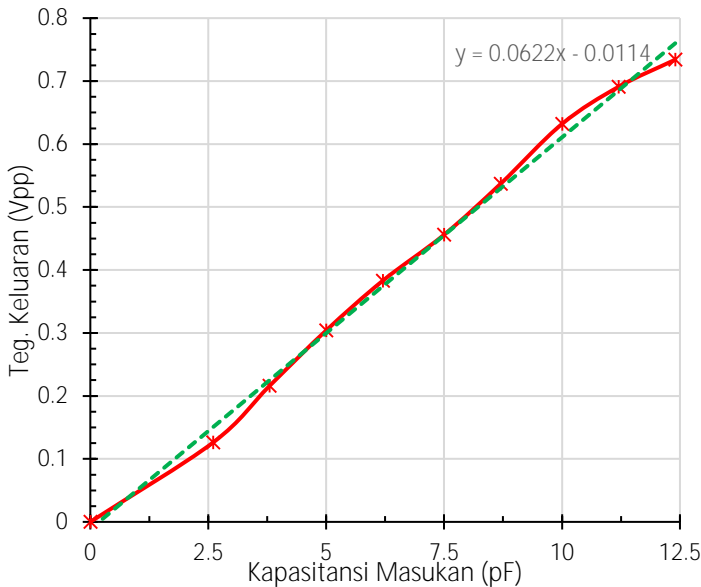
Pengujian dilakukan dengan mengukur amplitudo tegangan keluaran rangkaian penguat muatan ketika kapasitansi masukan diset pada nilai tertentu. Konfigurasi rangkaian yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 4.3. Rangkaian dieksitasi dengan sinyal gelombang sinusoidal 200 kHz dengan amplitudo 1 Volt.

Dari hasil regresi linier data pengujian pada Tabel 4.6 didapatkan karakteristik konversi penguat muatan sebesar 0,062 volt/pF. Kurva karakteristik C-V ditunjukkan pada Gambar 4.4. Kurva memiliki karakteristik linier pada rentang kapasitansi 3,8 pF hingga 10 pF dan mengalami penurunan sensitivitas pada nilai kapasitansi lebih dari 10 pF.

Nilai konversi yang didapatkan lebih rendah dari nilai teoretis sebesar 0,1 volt/pF untuk penguat muatan dengan umpanbalik kapasitor 10 pF.

Tabel 4.6 Karakteristik C-V penguat muatan

Kapasitor (pF)	Vout (Vpp)
0,0	0,000
2,6	0,126
3,8	0,216
5,0	0,304
6,2	0,383
7,5	0,456
8,7	0,537
10,0	0,632
11,2	0,691
12,4	0,734



Gambar 4.4 Karakteristik C-V penguat muatan

4.2.2 Filter *High-Pass*

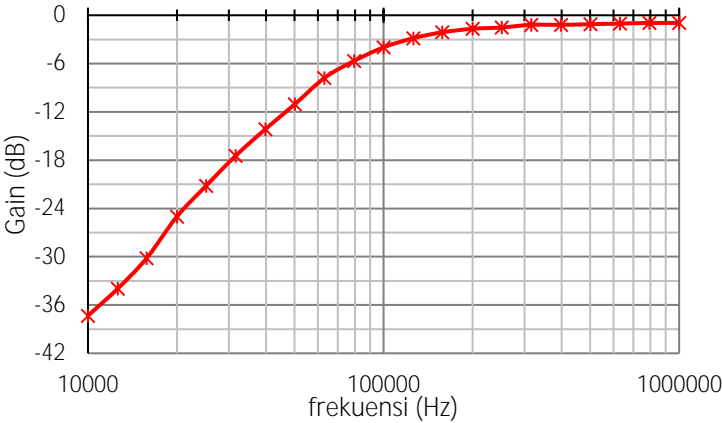
Pengujian filter high-pass dilakukan untuk mengetahui respons frekuensi dari filter. Pengujian dilakukan dengan mengukur amplitudo sinyal keluaran filter ketika filter dieksitasi dengan sinyal masukan sinusoidal amplitudo 1 Volt pada frekuensi tertentu dengan rentang frekuensi pengukuran antara 10 kHz hingga 1 MHz. Frekuensi pengukuran ditentukan secara logaritmik.

Data hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 4.7. Data diplotkan dalam grafik skala logaritmik untuk variabel frekuensi pada Gambar 4.5.

Dari hasil pengujian dapat diketahui bahwa filter memiliki penguatan *passband* sebesar -1 dB dan mengalami *cutoff* ketika penguatan sebesar -4 dB (-3 dB dari penguatan *passband*) pada frekuensi 100 kHz. Filter mengalami rolloff pada rentang *stopband* sebesar 12,3 dB per oktaf, sesuai dengan respons teoretis filter orde dua.

Tabel 4.7 Respons frekuensi filter high-pass

Frek (Hz)	V _{out} (Vpp)	Gain (dB)
10000	0,014	-37,3
12600	0,020	-34,0
15800	0,031	-30,2
20000	0,056	-25,0
25100	0,087	-21,2
31600	0,134	-17,5
39800	0,196	-14,2
50100	0,280	-11,1
63100	0,408	-7,8
79400	0,520	-5,7
100000	0,632	-4,0
126000	0,720	-2,9
158000	0,784	-2,1
200000	0,824	-1,7
251000	0,840	-1,5
316000	0,872	-1,2
398000	0,872	-1,2
501000	0,880	-1,1
631000	0,888	-1,0
794000	0,896	-1,0
1000000	0,896	-1,0



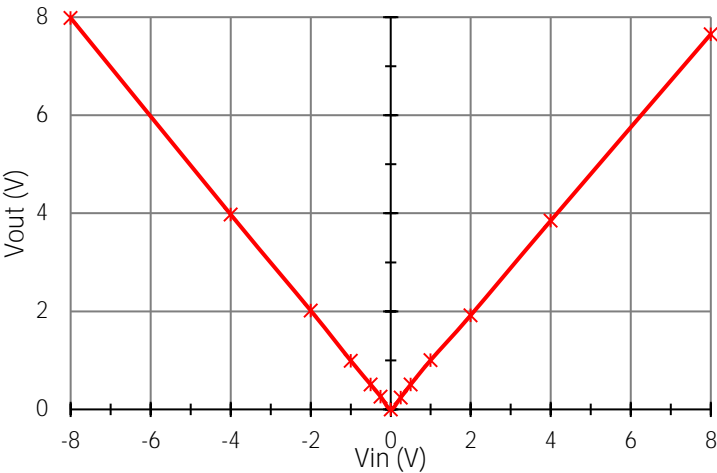
Gambar 4.5 Respons frekuensi filter high-pass

4.2.3 Penyearah Presisi

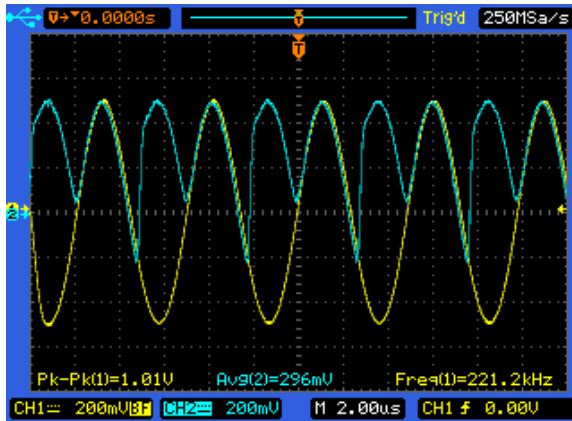
Pengujian penyearah presisi dilakukan untuk mengetahui respons tegangan keluaran rangkaian terhadap tegangan masukan.

Tabel 4.8 Karakteristik transfer penyearah presisi

V_{in} (V)	V_{out} (V)
8	7,654
4	3,850
2	1,921
1	1,006
0,5	0,508
0,25	0,243
0	0,004
-0,25	0,260
-0,5	0,507
-1	0,995
-2	2,017
-4	3,976
-8	7,986



Gambar 4.6 Karakteristik transfer penyearah presisi



Gambar 4.7 Respons dinamis penyearah presisi

Dari hasil pengukuran pada Tabel 4.8 yang diplotkan pada Gambar 4.6 dapat diketahui bahwa penyearah memiliki penguatan sebesar 0,954 untuk masukan positif dan -0,997 untuk masukan negatif. Terjadi perbedaan penguatan sebesar 4,4% antara masukan positif dan masukan negatif.

Dari pengamatan respons dinamik ketika rangkaian diberi masukan gelombang sinusoidal pada Gambar 4.7, dapat diketahui bahwa penyearah mengalami nonlinearitas pada awal siklus negatif. Nonlinearitas memiliki nilai konstan sehingga bernilai signifikan pada sinyal masukan kecil dan tidak signifikan pada sinyal masukan besar.

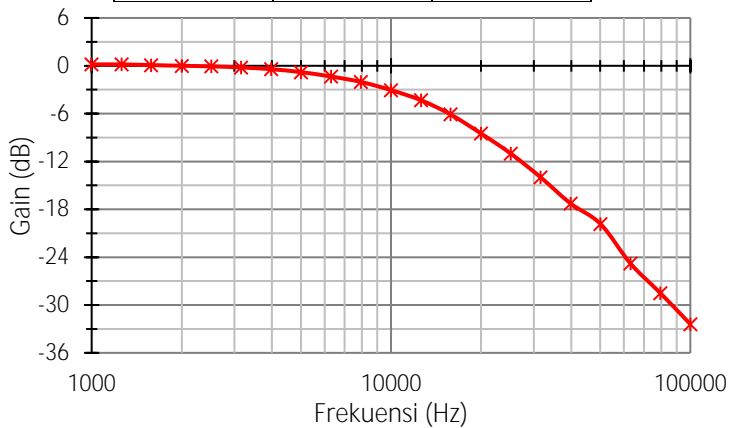
4.2.4 Filter *Low-Pass*

Pengujian filter low-pass dilakukan untuk mengetahui respons frekuensi dari filter. Pengujian dilakukan dengan mengukur amplitudo sinyal keluaran filter ketika filter dieksitasi dengan sinyal masukan sinusoidal 1 V_{pp} pada frekuensi tertentu pada rentang pengukuran frekuensi antara 1 kHz hingga 100 kHz.

Dari hasil pengujian pada Tabel 4.9 yang diplotkan pada Gambar 4.8, dapat diketahui bahwa filter mengalami cutoff pada frekuensi 10 kHz dan penguatan passband sebesar 0 dB. Filter mengalami rolloff pada rentang stopband sebesar 12,6 dB per oktaf, sesuai dengan respons teoretis filter orde dua sebesar 12 dB per oktaf.

Tabel 4.9 Respons frekuensi filter low-pass

Frek (Hz)	V _{out} (V _{pp})	Gain (dB)
1000	1,020	0,17
1260	1,020	0,17
1580	1,010	0,09
2000	1,000	0,00
2510	0,992	-0,07
3160	0,976	-0,21
3980	0,952	-0,43
5010	0,912	-0,80
6310	0,856	-1,35
7940	0,792	-2,03
10000	0,704	-3,05
12600	0,608	-4,32
15800	0,496	-6,09
20000	0,376	-8,50
25100	0,282	-11,00
31600	0,200	-13,98
39800	0,137	-17,27
50100	0,102	-19,83
63100	0,058	-24,79
79400	0,038	-28,50
100000	0,024	-32,40



Gambar 4.8 Respons frekuensi filter low-pass

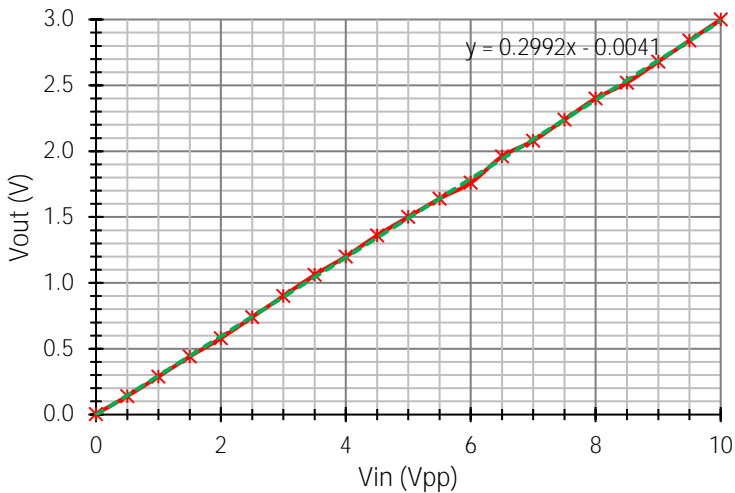
4.2.5 Konversi AC ke DC

Sistem konversi AC ke DC merupakan gabungan dari rangkaian penyearah presisi dan filter low-pass. Pengujian dilakukan untuk mengkarakterisasi tegangan keluaran rangkaian konversi terhadap amplitudo masukan sinyal sinusoidal berfrekuensi 200 kHz. Pengujian dilakukan dengan rentang tegangan masukan sebesar 0 Volt hingga 10 Volt.

Dari hasil regresi linier pada data pengujian di Tabel 4.10, didapatkan karakteristik transfer sebesar $0,299 V_{DC}/V_{AC}$. Hasil tersebut lebih rendah dari nilai teoretis karakteristik transfer sebesar $\sqrt{2}/4$ atau $0,354 V_{DC}/V_{AC}$. Kurva karakteristik transfer rangkaian dan hasil regresi ditampilkan pada Gambar 4.9.

Tabel 4.10 Respons rangkaian konversi AC ke DC

$V_{in} (V_{pp})$	$V_{out} (V)$
0,0	0,004
0,5	0,140
1,0	0,288
1,5	0,440
2,0	0,580
2,5	0,740
3,0	0,900
3,5	1,060
4,0	1,200
4,5	1,360
5,0	1,500
5,5	1,640
6,0	1,760
6,5	1,960
7,0	2,080
7,5	2,240
8,0	2,400
8,5	2,520
9,0	2,680
9,5	2,840
10,0	3,000



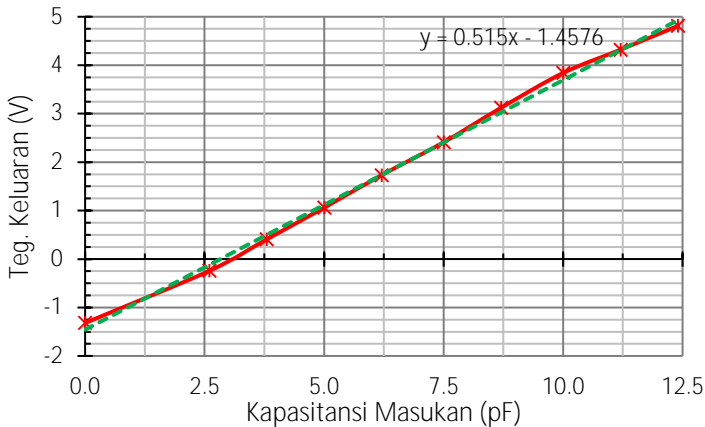
Gambar 4.9 Karakteristik transfer konverter AC ke DC

4.2.6 Respons Pengkondisi Sinyal

Pengujian respons keseluruhan pengkondisi sinyal dilakukan dengan mengukur nilai tegangan keluaran sistem terhadap nilai kapasitansi masukan. Kapasitansi masukan dieksitasi dengan sinyal sinusoidal frekuensi 200 kHz dan amplitudo 14 Volt. Pengujian dilakukan dengan menggunakan kapasitor variabel untuk mengemulasikan kapasitansi sensor. Hasil pengukuran diyampikan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Respons rangkaian pengkondisi sinyal

C_{in} (pF)	V_{out} (V)
0,0	-1,32
2,6	-0,242
3,8	0,408
5,0	1,06
6,2	1,73
7,5	2,41
8,7	3,12
10,0	3,84
11,2	4,32
12,4	4,81



Gambar 4.10 Respons rangkaian pengkondisi sinyal

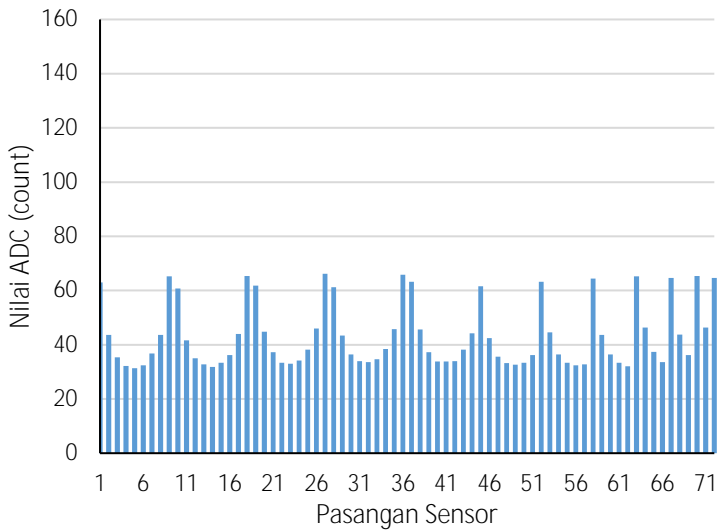
Dari hasil pengukuran dapat diketahui rangkaian pengkondisi sinyal memiliki sensitivitas sebesar 0,515 V/pF dan offset sebesar 1,458 V. Offset digunakan untuk mengkompensasi komponen parasitik pada rangkaian. Hasil pengukuran serta hasil regresi linier pada data diplotkan pada grafik Gambar 4.10.

4.3. Multiplexer Analog

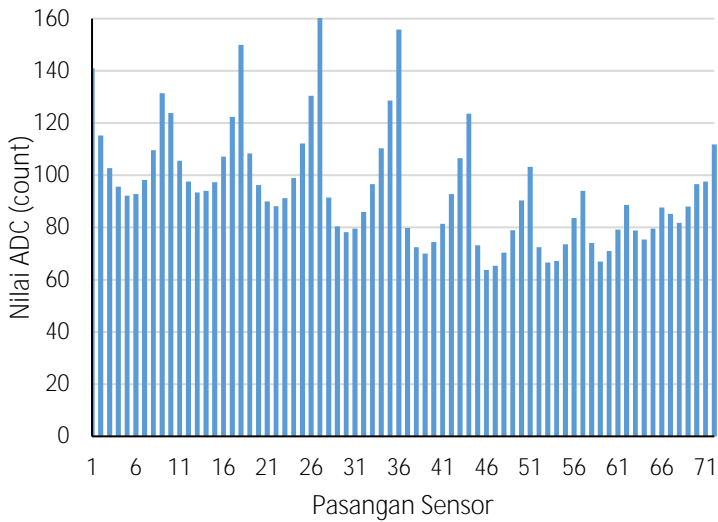
Hasil pengukuran pada multiplexer analog menunjukkan resistansi input-output rata-rata sebesar 107,6 Ohm saat switch dalam keadaan terhubung ke sumber eksitasi atau pengkondisi sinyal, dan resistansi sensor-ground rata-rata sebesar 52,3 Ohm saat switch dalam posisi grounded. Impedansi rata-rata switch dalam keadaan floating adalah sebesar 322,7 kOhm ke ground dan 454,9 kOhm ke masukan eksitasi atau keluaran pengkondisi sinyal.

4.4. Respons Sistem

Pengujian respons sistem dilakukan dengan merekam hasil pengukuran yang diterima oleh komputer dengan berbagai kondisi dalam sensor. Pengujian dilakukan pada saat sensor kosong dan sensor berisi air penuh. Pengukuran dilakukan sebanyak lima kali secara berurutan dengan media ukur yang sama. Udara digunakan sebagai referensi nol karena permittivitas relatif udara mendekati satu, sedangkan air digunakan sebagai referensi maksimum karena permittivitas air pada suhu ruang sebesar 80 merupakan salah satu bahan di alam dengan permittivitas tertinggi.



Gambar 4.11 Hasil pengukuran sensor kosong

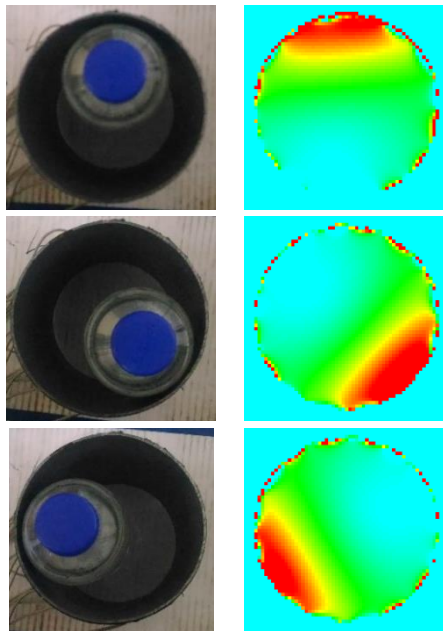


Gambar 4.12 Hasil pengukuran sensor berisi air

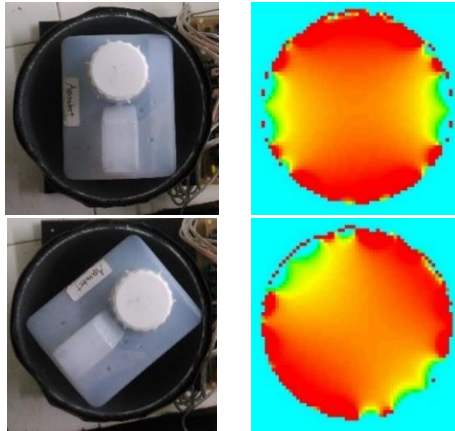
Dari hasil pengukuran sensor dengan isi udara pada grafik Gambar 4.11 dan isi air pada grafik Gambar 4.12, terdapat peningkatan nilai kapasitansi yang terukur oleh sistem akuisisi data. Dari hasil pengujian pada pasangan sensor yang berdampingan, didapatkan rerata pengukuran sebesar 64 LSB pada bahan udara dan 141 LSB pada media air. Pengujian pada pasangan sensor yang berseberangan didapatkan rerata pengukuran pada bahan udara sebesar 32 LSB dan pengukuran pada bahan air sebesar 92 LSB. Permittivitas relatif air pada suhu ruang adalah 80, sehingga didapatkan sensitivitas sebesar $0,96 \text{ LSB}/\epsilon_r$ pada sensor yang berdekatan dan $0,75 \text{ LSB}/\epsilon_r$ pada sensor yang berseberangan.

4.5. Rekonstruksi Citra

Pengujian dilakukan dengan meletakkan benda pada sensor dan mengamati citra hasil rekontruksi. Benda uji berupa botol berbentuk tabung dan prisma yang diisi dengan air. Data hasil rekonstruksi citra ditunjukkan pada Tabel 4.12 dan Tabel 4.13.



Gambar 4.13 Perbandingan posisi benda dan hasil rekonstruksi



Gambar 4.14 Perbandingan bentuk benda dan hasil rekonstruksi

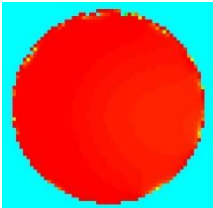
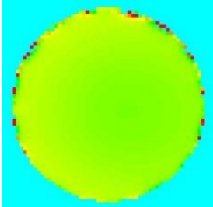
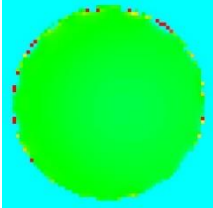
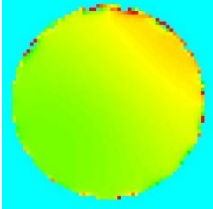
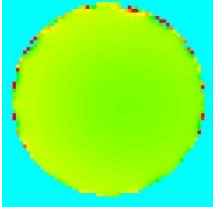
Data hasil pengujian rekonstruksi citra untuk objek botol berisi air yang diletakkan di tepi sensor ditunjukkan pada Gambar 4.13. Hasil menunjukkan bahwa citra rekonstruksi dapat menunjukkan posisi objek dengan tepat namun kurang baik dalam rekonstruksi bentuk objek.

Pengujian respons sistem terhadap botol air berbentuk prismatik ditunjukkan pada Gambar 4.14. Hasil menunjukkan bahwa rekonstruksi objek mampu merekonstruksi bentuk benda secara umum namun belum dapat membedakan bentuk detail benda.


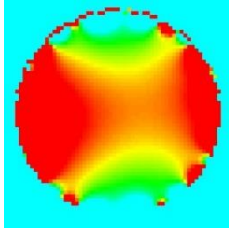

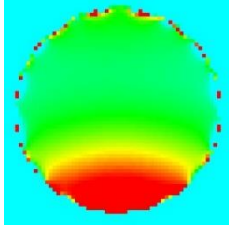
4.6. Selektivitas Sistem

Pengujian selektivitas dilakukan untuk menguji kemampuan sistem tomografi dalam membedakan berbagai macam bahan. Pengujian dilakukan dengan mengisi sensor dengan bahan uji hingga penuh. Bahan uji dikemas dalam kantong plastik agar tidak mengkontaminasi sensor. Bahan uji yang digunakan merupakan air, minyak goreng, biosolar, methyl alkohol 80%, dan larutan ammonium hidroksida (ammonia) 30%. Nilai pengukuran didapatkan dengan merata-rata nilai hasil rekonstruksi pada 50% bagian tengah sensor. Pengambilan data pengujian pada bagian tengah sensor ditujukan agar pengukuran tidak terpengaruh nilai pengukur tepi yang sangat tinggi. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.14. Pengujian dengan bahan nonhomogen ditunjukkan pada Tabel 4.15.

Tabel 4.14 Pengujian respons bahan homogen

Bahan Uji	Citra Rekonstruksi	Nilai Rekonstruksi
Air		1
Minyak Goreng		0,233
Biosolar		0,147
Methyl Alkohol 80%		0,406
Ammonium Hidroksida 30%		0,297

Tabel 4.15 Pengujian respons bahan nonhomogen

Bahan Uji	Benda Uji	Citra Rekonstruksi
Air/Alkohol		
Air/Minyak Goreng		

Hasil pengujian pada Tabel 4.14 dan Tabel 4.15 menunjukkan bahwa sistem tomografi dapat membedakan bahan benda uji berdasarkan perbedaan permittivitas bahan. Permittivitas air yang relatif tinggi menyebabkan sistem mengalami saturasi. Bahan-bahan yang memiliki nilai permittivitas yang saling berdekatan sulit dibedakan secara visual. Benda uji berbahan minyak goreng, ammonium hidroksida dan methyl alkohol menghasilkan rekonstruksi citra yang mirip secara visual, namun dapat dibedakan dengan menganalisis nilai perhitungan tiap piksel.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari perancangan, realisasi, dan pengujian alat pada tugas akhir ini dapat disimpulkan bahwa penggunaan elektroda tersegmentasi mampu meningkatkan sensitivitas sensor terhadap perubahan nilai permittivitas sebesar 2,76 kali lipat lebih besar jika dibandingkan dengan sensor elektroda tunggal. Penggunaan sensor berperisai mampu mengurangi efek gangguan eksternal terhadap hasil pengukuran sensor. Rangkaian pengkondisi sinyal memiliki sensitivitas sebesar 0,515 V/pF. Sistem akuisisi data secara keseluruhan memiliki sensitivitas sebesar 0,96 LSB/ ϵ_r pada sensor yang berdekatan dan 0,75 LSB/ ϵ_r pada sensor yang berseberangan.

Sistem tomografi yang dihasilkan dapat mendeteksi posisi benda secara akurat namun belum dapat membedakan betuk benda secara akurat. Sistem memiliki sensitivitas tertinggi ketika benda berada pada bagian tepi sensor. Sistem dapat mendiferensiasikan bahan benda berdasarkan perbedaan nilai permittivitas bahan. Sistem tomografi kapasitansi listrik dapat digunakan untuk mendeteksi posisi benda dalam pipa tanpa melakukan pengukuran yang invasif maupun destruktif.

5.2. Saran

Pada pengukuran sensor dengan impedansi sangat tinggi, adanya sifat-sifat parasitik berupa kapasitansi parasitik, kebocoran arus (konduktansi parasitik) maupun injeksi derau pada rangkaian sangat berpengaruh pada hasil pengukuran. Untuk meningkatkan kinerja pengukuran, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan desain rangkaian yang meminimalisasi komponen-komponen parasitik dan lebih tahan terhadap derau eksternal. Untuk mendapatkan hasil rekonstruksi citra yang akurat diperlukan pemodelan sensor yang lebih akurat pada proses perhitungan peta sensitivitas.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. T. Ulaby, *Fundamentals of Applied Electromagnetics*, New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [2] R. Halliday and Walker, *Fundamenat of Physics*, New YYprk: John Wiley & Sons, 2004.
- [3] H. Herdian, "Hardware Implementation of Linear Back-Projection Algorithm for Capacitance Tomography," *ICICI-BME*, vol. 4, pp. 124-129, November 2015.
- [4] F. Wang, Q. Marashdeh, L. S. Fan and Warsito, "Electrical Capacitance Volume Tomography: Design and Application," *Sensors*, vol. 10, pp. 1890-1917, 2010.
- [5] A. Shafquet, I. Ismail and A. Jaafar, "Modeling and Simulation of Multi-Plane Electrical Capacitance Tomography Sensor for Flow Imaging by Using Finite Element Analysis," in *5th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*, Juni 2014.
- [6] S. M. Din, N. A. M. Razali, A. Azmi, C. P. Song, R. A. Rahim and L. P. Ling, "Comparison of Single and Segmented Excitation of Electrical Capacitance Tomography," in *10th Asian Control Conference*, Juni 2015.
- [7] K. J. Alme and S. Mylvaganam, "Electrical Capacitance Tomography—Sensor Models, Design, Simulations, and Experimental Verification," *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 6, no. 5, pp. 1256-1266, Oktober 2006.
- [8] W. Q. Yang and L. H. Peng, "Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography," *Measurement Science and Technology*, no. 14, pp. R1-R13, 2003.

- [9] F. Dickin and M. Wang, "Electrical resistance tomography for process applications," *Measurement Science and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 247-260, 1996.
- [10] Pusat Pengembangan Teknologi Informasi dan Komputasi - BATAN, "Image Reconstruction Algorithm for Electrical Capacitance Tomography," BATAN, 2004.
- [11] C. Xie, S. Huang, M. Beck, B. Hoyle, R. Thorn, C. Lenn and D. Snowden, "Electrical capacitance tomography for flow imaging: system model for development of image reconstruction algorithms and design of primary sensors," in *IEEE Proceedings on Circuits, Devices and Systems*, 1992.
- [12] A. Yusuf, H. Sudibyo, D. Sudiana, A. S. Tamsir, I. Muttakin, W. Widada and W. P. Taruno, "Switch Configuration Effect on Stray Capacitance in Electrical Capacitance Volume Tomography Hardware," *Telkomnika*, vol. 14, no. 2, pp. 456-463, Juni 2016.
- [13] A. Devices, "Analog Switches and Multiplexers Basics," Analog Devices, Inc., Norwood, Oktober 2008.
- [14] NXP Semiconductor, "HEF4066B Quad single-pole single-throw analog switch," NXP Semiconductors N.V., Eindhoven, April 2016.
- [15] Intersil, "ICL8038 Precision Waveform Generator/Voltage Controlled Oscillator," Intersil, Palm Bay, April 2001.
- [16] Hamamatsu, "Characteristics and use of Charge Amplifier," Hamamatsu, Hamamatsu City, Oktober 2001.
- [17] N. Aupetit, "Signal conditioning for shock sensors," ST Microelectronics, Agustus 2015.
- [18] B. Carter and T. R. Brown, "Handbook of Operational Amplifier Applications," Texas Instruments, Dallas, September 2016.
- [19] H. Zumbahlen, "Sallen-Key Filters," Analog Devices, Inc., Norwood, Juli 2012.
- [20] J. Karki, "Analysis of the Sallen-Key Architecture," Texas Instruments, Dallas, September 2002.

- [21] D. Ducu, "Op Amp Rectifiers, Peak Detectors and Clamps," Microchip Technology Inc., Chandler, 2011.
- [22] Texas Instruments, "LF353 Wide-Bandwidth JFET-Input Dual Operational Amplifier," Texas Instruments, Texas, Maret 2016.
- [23] Atmel, "8-bit AVR Microcontroller ATmega8A DATASHEET COMPLETE," Atmel Corporation, San Jose, September 20015.
- [24] Texas Instruments, "MAX232x Dual EIA-232 Drivers/Receivers," Texas Instruments, Dallas, November 2014.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Firmware Mikrokontroller

```
#include <stdlib.h>
#include <iobits.h>
#include <delay.h>
#include <mega8.h>
#include <string.h>

unsigned char dat[4], rec, mod, rcp, s00[16] = {0,0,0,0,1,0,1,1};

interrupt [USART_RXC] void rsrx(void) {
    unsigned char rcv = UDR;
    if(rcv != '\n') {
        dat[rcp%4] = rcv;
        rcp++;
    }
    else {
        rcp = 0;
        rec = 1;
    }
};

void rstx(unsigned char *snd) {
    while (*snd) {
        while (!(UCSRA & 0x20));
        UDR = *snd;
        snd++;
    }
};

unsigned int adcr(unsigned char adi) {
    ADMUX = adi;
    delay_ms(2);
    ADCSRA |= 0x40;
    while ((ADCSRA & 0x10) == 0);
    ADCSRA |= 0x10;
    return ADCW;
}
```

```
}
```

```
unsigned char *pair(unsigned char src, unsigned char sns) {  
    static unsigned char plt[16];  
    unsigned char cna;  
    for (cna=0; cna<16; cna++) {plt[cna] = 3;};  
    plt[(src+14)%16] = 0;  
    plt[(src+15)%16] = 1;  
    plt[src] = 1;  
    plt[src+1] = 1;  
    plt[src+2] = 0;  
    plt[sns-2] = 0;  
    plt[sns-1] = 2;  
    plt[sns] = 2;  
    plt[(sns+1)%16] = 2;  
    plt[(sns+2)%16] = 0;  
    return plt;  
}
```

```
unsigned char *swsr(unsigned char *ss) {  
    static unsigned char sw[128];  
    unsigned char idx, cna, cnb, sta;  
    for (cna = 0; cna < 128; cna++) {sw[cna] = s00[cna%8];};  
    for (cna = 0; cna < 16; cna+=4) {  
        for (cnb = 0; cnb < 4; ++cnb) {  
            idx = cna*8;  
            sta = *(ss+cna+cnb);  
            if (sta == 1) {  
                switch (cnb) {  
                    case 0:  
                        sw[(idx+ 1)] = 1;  
                        sw[(idx+ 7)] = 0;  
                        sw[(idx+10)] = 1;  
                        break;  
                    case 1:  
                        sw[(idx+ 0)] = 1;  
                        sw[(idx+ 2)] = 1;  
                        sw[(idx+ 6)] = 0;  
                        break;  

```

```

        case 2:
            sw[(idx+ 3)] = 1;
            sw[(idx+ 9)] = 1;
            sw[(idx+15)] = 0;
        break;
        case 3:
            sw[(idx+ 8)] = 1;
            sw[(idx+11)] = 1;
            sw[(idx+14)] = 0;
        break;
    };
}
else if (sta == 2) {
    switch (cnb) {
        case 0:
            sw[(idx+17)] = 1;
            sw[(idx+23)] = 0;
            sw[(idx+26)] = 1;
        break;
        case 1:
            sw[(idx+16)] = 1;
            sw[(idx+18)] = 1;
            sw[(idx+22)] = 0;
        break;
        case 2:
            sw[(idx+19)] = 1;
            sw[(idx+25)] = 1;
            sw[(idx+31)] = 0;
        break;
        case 3:
            sw[(idx+24)] = 1;
            sw[(idx+27)] = 1;
            sw[(idx+30)] = 0;
        break;
    };
}
else if (sta == 0) {
    switch (cnb) {
        case 0:

```

```

        sw[(idx+ 1)] = 1;
        sw[(idx+ 7)] = 1;
        sw[(idx+10)] = 0;
        sw[(idx+17)] = 1;
        sw[(idx+23)] = 1;
        sw[(idx+26)] = 0;
    break;
    case 1:
        sw[(idx+ 0)] = 1;
        sw[(idx+ 2)] = 0;
        sw[(idx+ 6)] = 1;
        sw[(idx+16)] = 1;
        sw[(idx+18)] = 0;
        sw[(idx+22)] = 1;
    break;
    case 2:
        sw[(idx+ 3)] = 0;
        sw[(idx+ 9)] = 1;
        sw[(idx+15)] = 1;
        sw[(idx+19)] = 0;
        sw[(idx+25)] = 1;
        sw[(idx+31)] = 1;
    break;
    case 3:
        sw[(idx+ 8)] = 1;
        sw[(idx+11)] = 0;
        sw[(idx+14)] = 1;
        sw[(idx+24)] = 1;
        sw[(idx+27)] = 0;
        sw[(idx+30)] = 1;
    break;
};
}
else {};
};
};
return sw;
}

```

```

void bbng(unsigned char *sh) {
    unsigned char cnc;
    CLRBIT(PORTB,2);
    for (cnc = 0; cnc < 128; ++cnc) {
        if (*(sh+cnc) == 1) {SETBIT(PORTB,1);}
        else {CLRBIT(PORTB,1)};
        delay_us(1);
        SETBIT(PORTB,2);
        delay_us(10);
        CLRBIT(PORTB,2);
    };
    CLRBIT(PORTB,1);
}

void scan(void) {
    unsigned char src, sns, buf[10], cna, cnb = 0;
    unsigned int val, res[72];
    for (src = 0; src < 12; ++src) {
        for (sns = 4; sns < 16; ++sns) {
            if(sns-src > 12) {continue;};
            if(sns-src < 4) {continue;};
            val = 0;
            bbng(swsr(pair(src, sns)));
            for (cna = 0; cna < 4; ++cna) {val += adcr(4)};
            res[cnb] = val/4;
            cnb++;
        };
    };
    for (cna = 0; cna < 72; cna++) {
        itoa(res[cna], buf);
        rstx(buf);
        rstx(" ");
    };
    rstx("\n");
};

void main(void) {
    DDRB = 0x06;
    UCSRB = 0x98;
}

```

```

UCSRC = 0x86;
UBRR1 = 0x0C;
ADCSRA = 0x83;
#asm("sei")
while (1) {
    if(rec) {
        rec = 0;
        if (!strcmp(dat,"C",1)) {
            mod = 1;
        } else if (!strcmp(dat,"S",1)) {
            mod = 0;
            scan();
        };
    };
    if (mod) {scan();};
};
}

```

Perangkat Lunak Perhitungan Peta Sensitivitas

```
s      = load(strcat('0EP0.txt'));
s(:,2) = load(strcat('0EP1.txt'));
s(:,3) = load(strcat('0EP2.txt'));
s(:,4) = load(strcat('0EP3.txt'));
s(:,5) = load(strcat('0EP4.txt'));
s(:,6) = load(strcat('0EP5.txt'));
s(:,7) = load(strcat('0EP6.txt'));
s(:,8) = load(strcat('0EP7.txt'));
s(:,9) = load(strcat('0EP8.txt'));
s(:,10) = load(strcat('0EP9.txt'));
s(:,11) = load(strcat('0EPa.txt'));
s(:,12) = load(strcat('0EPb.txt'));
s(:,13) = load(strcat('0EPc.txt'));
s(:,14) = load(strcat('0EPd.txt'));
s(:,15) = load(strcat('0EPe.txt'));
s(:,16) = load(strcat('0EPf.txt'));
r      = load('roi2.dat');
pp(:,1,:)=round(s(:,1,:))+61;
pp(:,2,:)=round(s(:,2,:))+61;
pp(:,3,:)=s(:,4,:);
pp(:,4,:)=s(:,5,:);
px = zeros(121);
py = zeros(121);
rpx = zeros(61);
rpy = zeros(61);
rr = zeros(61);

for i=1:14641
    for j=1:16
        px(pp(i,1,j),pp(i,2,j),j)=pp(i,3,j);
        py(pp(i,1,j),pp(i,2,j),j)=pp(i,4,j);
    end
end

for i=1:2:121
    for j=1:2:121
        for k=1:16
```

```

        rpx((i+1)/2,(j+1)/2,k)=px(i,j,k);
        rpy((i+1)/2,(j+1)/2,k)=py(i,j,k);
    end
    rr((i+1)/2,(j+1)/2) = r(i,j);
end
end

```

```

x = 1;
for i=1:12
    for j=5:16
        if j-i > 12; continue; end;
        if j-i < 4; continue; end;
        pair(x,:) = [i,j];
        srx = rpx(:,i);
        sry = rpy(:,i);
        snx = rpx(:,j);
        sny = rpy(:,j);
        sx = srx.*snx;
        sy = sry.*sny;
        sen = -(sx+sy);
        sen = sen.*rr/800;
        for k=1:61
            for l=1:61
                if sen(k,l)<-1
                    sen(k,l)=-1;
                end
                if sen(k,l)>1
                    sen(k,l)=1;
                end
            end
        end
        lsen = reshape(sen,3721,1);
        senm(:,x) = lsen;
        x = x+1;
    end
end

```

```

save('sen.dat', 'senm', '-ascii');

```


Perangkat Lunak Rekonstruksi Citra

```
Imports Emgu.CV.Structure
```

```
Public Class Form1
```

```
    Dim mapD(71, 60, 60) As Double
```

```
    Dim dat As String()
```

```
    Dim sst, smd As Boolean
```

```
    Dim img As New Image(Of Hsv, Byte)(305, 305)
```

```
    Public Sub Form1_Load() Handles MyBase.Load
```

```
        Dim inTxt As String =
```

```
My.Computer.FileSystem.ReadAllText("sen.dat",
```

```
System.Text.Encoding.UTF8)
```

```
    Dim mS() As String = Split(inTxt, " ")
```

```
    Dim myPort As Array = IO.Ports.SerialPort.GetPortNames()
```

```
    selSP.Items.AddRange(CType(myPort, Object()))
```

```
    selSP.SelectedIndex = 0
```

```
    selBR.SelectedItem = "38400"
```

```
    For j As UInt16 = 0 To 71
```

```
        For x As UInt16 = 0 To 60
```

```
            For y As UInt16 = 0 To 60
```

```
                mapD(j,x,y) = Convert.ToDouble(mS(1+j+y*72+x*72*61))
```

```
            Next
```

```
        Next
```

```
    Next
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Connect() Handles bSerCD.Click
```

```
    If (sst = False) Then
```

```
        spl.PortName = selSP.Text
```

```
        spl.BaudRate = CInt(selBR.Text)
```

```
        spl.Open()
```

```
        sst = True
```

```
        bSerCD.Text = "Disconnect"
```

```
        bScnSS.Enabled = True
```

```
        bScnCS.Enabled = True
```

```
    Else
```

```
        spl.Close()
```

```
        sst = False
```

```

        bSerCD.Text = "Connect"
        bScnSS.Enabled = False
        bScnCS.Enabled = False
    End If
End Sub

Public Sub SerDat() Handles sp1.DataReceived
    Dim dat As String() = sp1.ReadLine.Split(" ")
    Dim imr(60, 60), ima(60, 60), imb(60, 60), sen(71) As Double
    For j As UInt16 = 0 To 71
        sen(j) = Convert.ToUInt16(dat(j)) / 1024
    Next
    For x As UInt16 = 0 To 60
        For y As UInt16 = 0 To 60
            For z As UInt16 = 0 To 71
                ima(x, y) += sen(z) * mapD(z, x, y)
                imb(x, y) += mapD(z, x, y)
            Next
            imr(x, y) = ima(x, y) * 2 / (imb(x, y) + 0.0000000001)
        Next
    Next
    For x As Int64 = 0 To 60
        For y As Int64 = 0 To 60
            For m As Int32 = 0 To 4
                For n As Int32 = 0 To 4
                    img.Data(x*5+m,y*5+n,0) = CByte(1-imr(60-x, y)*90)
                    img.Data(x * 5 + m, y * 5 + n, 1) = 255
                    img.Data(x * 5 + m, y * 5 + n, 2) = 255
                Next
            Next
        Next
    Next
    imgDIS.Image = img
End Sub

Private Sub AcqSer() Handles bSerRF.Click
    Dim myPort As Array = IO.Ports.SerialPort.GetPortNames()
    selSP.Items.Clear()
    selSP.Items.AddRange(CType(myPort, Object()))
End Sub

```

```
Private Sub AcqSgl() Handles bScnSS.Click
    sp1.WriteLine("S")
End Sub
Private Sub AcqCon() Handles bScnCS.Click
    If (smd = False) Then
        smd = True
        bScnCS.Text = "Stop"
        sp1.WriteLine("C")
    Else
        smd = False
        bScnCS.Text = "Continuous"
        sp1.WriteLine("S")
    End If
End Sub
End Class
```

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Ardian Wardhana dilahirkan di Pacitan 14 Oktober 1993. Anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Suwardi dan Tukinah. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN Punung I, dilanjutkan dengan pendidikan menengah di SMPN 1 Punung dan SMAN 1 Pacitan. Pada tahun 2012, penulis memulai pendidikannya di jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) di kota Surabaya dengan konsentrasi pada bidang studi Elektronika. Selama perkuliahan, penulis aktif mengikuti kegiatan kampus seperti UKM Korps Suka Rela (KSR) PMI ITS dan juga kegiatan laboratorium sebagai asisten laboratorium Elektronika Dasar.

Email : ardian.wardhana@gmail.com

(halaman ini sengaja dikosongkan)